



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**TESTOVÁNÍ ČÁSTÍ ODĚVU POMOCÍ  
TEPELNÉHO MANEKÝNA**

MEASUREMENT OF CLOTHING SETS BY MEANS OF THERMAL MANIKIN

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Martin Hanzlík**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.**

**BRNO 2017**



## Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Bc. Martin Hanzlík**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Technika prostředí  
Vedoucí práce: **Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### Testování částí oděvu pomocí tepelného manekýna

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ochranné rukavice proti chladu zabezpečují ochranu dlaní, prstů a hřbetů rukou před zvýšeným odvodem tepla v prostředích s nízkou teplotou. Dle normovaných postupů se rozlišují třídy ochrany pro odvod tepla konvekci a pro odvod tepla vedením. Pro dodržení normovaných postupů a korektní experimentální ověření vlastností vyvíjených ochranných rukavic je však třeba experimentálně ověřit funkčnost metodiky s vybavením, které je na VUT FSI k dispozici a ověřit i jeho použitelnost pro speciální, modulární typy rukavic.

#### Cíle diplomové práce:

Cílem práce je shromáždit poznatky a podklady týkající se testování tepelně technických vlastností ochranných částí oděvu pro outdoorové aktivity (např. rukavice, boty, části oděvu). Následně pak realizovat a ověřit procedury testování s využitím tepelného manekýna Newtona. U vybraných referenčních vzorků změřit tepelný odpor, provést rozbor opakovatelnosti měření, rozptylu hodnot, statistické nejistoty měření atd. Výsledkem práce bude sada dat k referenčním vzorkům s kompletně popsány vlastnosti tepelného odporu jednotlivých vzorů, ale i jejich kombinace v sestavě.

#### Seznam literatury:

MATHUR, G. D. Vehicle thermal management: heat exchangers & climate control. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, c2004. PT (Series) (Warrendale, Pa.), 97. ISBN 076801445X.

NILSSON, H. Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models, PhD thesis, University of Gävle (2004).

ČSN EN ISO 14505-2. Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelného komfortu ve vozidlech. Český normalizační institut (2007).

FOJTLÍN, M.; FIŠER, J.; JÍCHA, M. Determination of convective and radiative heat transfer coefficients using 34-zones thermal manikin: Uncertainty and reproducibility evaluation. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, roč. 77, č. 2016, s. 257-264. ISSN: 0894-1777.

PIDROVÁ, K. Testování tepelných vlastností rukavic pomocí tepelného manekýna. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 69 s. Vedoucí Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 14. 11. 2016



doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá experimentálním měřením tepelného odporu rukavic a jejich modulární kombinací, které proběhlo dle metodiky uvedené v normě ČSN EN 511 a pomocí tepelného manekýna. V první části práce je rešeršně zpracována problematika přenosu tepla, materiály rukavic a metodiky měření. Hlavní částí práce je diskuze výsledků měření a návrh výpočtových vztahů pro určení výsledného tepelného odporu modulárních kombinací rukavic na základě naměřených hodnot jednotlivých vzorků tuto kombinaci tvořících. Vyhodnocením těchto výpočtových hodnot ukázalo, že tepelný odpor modulárních rukavic nelze dostatečně přesně určit výpočtem z hodnot tepelných odporů jednotlivých rukavic a pro získání přesné hodnoty je tedy nutné experimentálně změřit celý trojmodul.

## **Klíčová slova**

Modularita rukavic, ČSN EN 511, experimentální měření tepelného odporu, mechanismy přenosu tepla.

## **Abstract**

This diploma thesis is focused on the experimental determination of thermal resistance of the gloves and their combination in the layering system. The measurement was based on procedure specified in the standard ČSN EN 511 by means of thermal manikin. The thesis begins with the description of heat transfer mechanisms, description of glove materials and measurement methodology. The body of paper consists of the measured data analysis and equation design for determination of the glove layering system thermal resistance. At the end of the thesis, these equations are evaluated and it has been shown, that the thermal resistance of glove layering system cannot be precisely determined by the calculation, and it is necessary to measure the whole three-layer system.

## **Keywords**

Glove layering system, the standard ČSN EN 511, experimental measurement of thermal resistance, heat transfer mechanisms.



# BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HANZLÍK, Martin. Testování částí oděvu pomocí tepelného manekýna. Brno, 2017, 99 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.





Rád bych poděkoval za odborné vedení mé diplomové práce Ing. Bc. Janu Fišerovi, Ph.D. a jeho cenné rady, věcné připomínky při měření a neskonalou vstřícnost při konzultacích.

Také děkuji firmě Holík International s.r.o., konkrétně panu Pekařovi a paní Ponížilové, za to, že zajistili výrobu a poskytnutí prototypových vzorků rukavic využitých při řešení diplomové práce.

Bc. Martin Hanzlík



Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Testování částí oděvu pomocí tepelného manekýna vypracoval samostatně pod vedením Ing. Bc. Jana Fišera, Ph.D. a s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury.

V Brně, dne 24. 5. 2017

Bc. Martin Hanzlík



# OBSAH

<b>BIBLIOGRAFICKÁ CITACE .....</b>	<b>4</b>
<b>OBSAH.....</b>	<b>13</b>
<b>VYMEZENÍ CÍLŮ A LIMITŮ PRÁCE .....</b>	<b>15</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>17</b>
<b>1 TEORETICKÉ PODKLADY .....</b>	<b>18</b>
1.1 Historie .....	18
1.2 Tepelná pohoda.....	19
1.3 Přímé mechanismy přenosu tepla: .....	20
1.3.1 Přenos tepla vedením (kondukce).....	20
1.3.2 Přenos tepla prouděním (konvekce) .....	22
1.3.3 Přenos tepla zářením (radiace).....	24
1.4 Termofyziologické procesy ovlivňující přenos tepla .....	25
1.4.1 Vypařování vody .....	25
1.4.2 Vasokonstrikce a vasodilatace .....	25
1.5 Centrální regulace tělesné teploty .....	26
1.6 Tepelný odpor rukavic .....	27
<b>2 KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY RUKAVIC .....</b>	<b>28</b>
2.1 Modularita rukavic.....	29
2.2 Voděodolné a prodyšné membrány .....	29
2.3 Další materiály použité v konstrukci rukavic .....	33
<b>3 METODIKA MĚŘENÍ.....</b>	<b>35</b>
3.1 Metodika dle norem ČSN EN 511 a ČSN EN ISO 15831 .....	35
3.1.1 Norma ČSN EN 511 „Ochranné rukavice proti chladu“ .....	35
3.1.2 Norma ČSN EN ISO 15831 „Oděvy – Fyziologické účinky – Měření tepelné izolace pomocí tepelné figuríny“ .....	37
3.2 Popis využitého měřicího zařízení .....	37
3.2.1 Tepelný manekýn Newton.....	37
3.2.2 Klimatická komora.....	40
3.2.3 Multifunkční měřič Testo 435 .....	41
3.3 Příprava a průběh měření .....	43
<b>4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT.....</b>	<b>46</b>
4.1 Materiálové složení rukavic .....	46

4.1.1	Rukavice pro srovnávací testy metodik .....	46
4.1.2	Rukavice pro testování modularity.....	48
4.2	Průběh experimentu .....	52
4.3	Zpracování dat .....	52
4.4	Naměřená data .....	53
4.4.1	Vyhodnocení opakovatelnosti.....	60
4.5	Nejistoty měření .....	61
4.5.1	Nejistota typu A .....	61
4.5.2	Nejistota typu B .....	62
<b>5</b>	<b>SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH VYHODNOCENÍ.....</b>	<b>65</b>
5.1	Srovnání metodiky Pidrové a metodiky dle normy ČSN EN 511 .....	65
5.2	Měření dle normy ČSN EN 511 a ČSN EN ISO 15831 .....	66
5.2.1	Samostatně měřené rukavice .....	67
5.2.2	Kombinace převlekových rukavic a středové rukavice .....	69
5.2.3	Kombinace převlekových a podvlekových rukavic.....	70
5.2.4	Kombinace středové a podvlekových rukavic .....	71
5.2.5	Trojkombinace (kombinace palčáku Pre2, střední rukavice a podvlekových rukavic).....	72
<b>6</b>	<b>TEORETICKÝ VÝPOČET TEPELNÉHO ODPORU RUKAVIC .....</b>	<b>76</b>
6.1	Součet jednotlivých tepelných odporů v porovnání s tep. odporem celé kombinace .....	76
6.2	Výpočet tepelného odporu vzorku rozdílem dvou kombinací .....	79
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>81</b>
	<b>CITOVANÁ LITERATURA.....</b>	<b>83</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>87</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>89</b>

## VYMEZENÍ CÍLŮ A LIMITŮ PRÁCE

### Cíle diplomové práce

- Shromáždit poznatky a podklady týkající se testování tepelně technických vlastností ochranných částí oděvu pro outdoorové aktivity (např. rukavice, boty, části oděvu).
- Srovnání metodiky testování tepelných vlastností rukavic vytvořenou a použitou v diplomové práci Pidrové [1] a metodiky dle normy ČSN EN 511 „Ochranné rukavice proti chladu“. Rozdíl metodik je popsán v kapitole 5.1.
- Určení tepelných odporů vybraných vzorků rukavic a jejich modulárních kombinací s využitím vhodného přístrojového vybavení.
- Popis jednotlivých modulárních kombinací.
- Rozbor opakovatelnosti provedených měření a výpočet jejich nejistot.

### Limity diplomové práce

- Tepelné odpory rukavic jsou stanoveny pouze dle normy ČSN EN 511 „Ochranné rukavice proti konvektivnímu chladu“. Rukavice nejsou testovány vůči kontaktnímu chladu, protože fakulta nevlastní potřebné přístrojové vybavení.
- U některých vzorků byla provedena pouze dvě opakování měření, což by vedlo u výpočtu nejistoty typu A k použití bezpečnostního faktoru  $k_{UA} = 7$ . Tato práce ovšem navazuje na práce Pidrové [1] a Fojtlína [2], na základě jejichž výsledků můžeme uvažovat normální rozdělení pravděpodobnosti dat, a proto lze tedy s vysokou mírou jistoty použít bezpečnostní faktor  $k_{UA} = 2$ .
- Počet měření byl limitován vysokým časovým vytížením klimatické komory a tepelného manekýna, protože tato zařízení jsou využívána v řadě výzkumných projektů i zakázkových měření pro různé společnosti.





## ÚVOD

V současné době se s rostoucí mírou turismu stále zvyšuje množství lidí vystavených mnohdy extrémním zimním podmínkám. Mnozí vyražejí do exotických lokací, aby se pokusili zdolat nějakou velehoru, užít si lyžování vysoko v horách či na ledovci. I v relativně mírném podnebí hor o nadmořských výškách mezi 2800–3700 m. n. m. utrpí každým rokem cca 37 % horalů omrzliny [2]. Tento fakt není často zapříčiněn pouze špatným počasím, ale také špatnou přípravou a zejména použitím nevhodného vybavení.

Lidské tělo v případě podchlazení jako první omezí množství tepla proudící do periferních částí, jako jsou končetiny a uši. V chladném prostředí je nutné tyto části těla řádně chránit a zabránit vzniku omrzlin. Zároveň je žádoucí zachovat jejich dostatečnou pohyblivost, zejména rukou. Jak při horských expedicích, tak i jinde je často nutné, aby člověk i ve velice chladných podmínkách byl nadále schopen provádět úkony náročné na jemnou motoriku. Schopnost jedince v krizovém okamžiku jednat a použít nouzové prostředky (např. únikový východ, signalizační světlice) může být pro jeho život kritická.

Použití modulárních systémů rukavic, sestávající z více samostatně funkčních rukavic, složených obvykle do troj-modulu: podvleková rukavice, středová rukavice a převleková rukavice, dává člověku možnost zvolit v daném okamžiku právě takový stupeň ochrany, jaký potřebuje. V případě nutnosti může člověk svrchní převlekovou rukavicí sundat a daný přístroj či nástroj ovládat chráněn pouze spodní tenkou podvlekovou rukavicí. Jeho motorické schopnosti jsou rapidně zvýšeny při zachování dostatečného tepelného komfortu.

V současné době je na trhu mnoho materiálů vhodných pro výrobu rukavic. Pro výrobce se stává rozhodnutí, které materiály zvolit, stále těžší a těžší. Proto se v naší době nelze obejít bez podrobného testování rukavic během jejich vývoje. Jen tak je možné zajistit, že se daná kombinace materiálů na požadovanou činnost hodí a pro výrobce má ekonomický smysl ji vyrábět.

Tato práce se zabývá problematikou testování rukavic dle požadavků specifikovaných v normě ČSN EN 511 „Ochranné rukavice proti chladu“ a aplikací této metodiky na modulární rukavice. Tuto normu používají výrobci a certifikované zkušebny v celé Evropské unii pro srovnávací testování produktů a zjištění tepelných vlastností rukavic.

# 1 TEORETICKÉ PODKLADY

## 1.1 Historie

V historii lidské společnosti se role rukavic postupně vyvíjela. Po několik století byly rukavice symbolickou částí oděvu, často nošenou jako indikátor společenského postavení a moci. Dnes lze rukavice obecně považovat za formu ochranného prostředku rukou v chladném prostředí či při činnostech, které by mohly způsobit fyzické poranění, či kontaminaci rukou nežádoucími materiály a látkami. Toto měnící se pojetí ilustruje různé role, které rukavice hrály v průběhu dějin a jejich rozšiřující se význam od čistě módní a společenské záležitosti po široce používaný ochranný prostředek [3].

První průmyslová výroba rukavic začala v desátém století v dnešní Velké Británii, původní použití rukavic se omezovalo na oblast válčení a ochranu rukou před zraněními v boji. Rukavice byly typicky vyrobeny z kůže místních jelenů, ovčí nebo importovaných kůží. Rytíři nosili ochranné rukavice vyrobené z kroužkové oceli. Masové používání rukavic jako módních doplňků ovšem začalo až v sedmnáctém století [4].

Na počátku století bylo nošení rukavic primárně omezeno na elitní společenské třídy a vyjadřovalo bohatství a nadřazené postavení nositele. Design rukavic byl navržen tak, aby doplňoval módní, vysoce dekorativní a vzorované styly oblečení. V druhé polovině století se rukavice staly samy o sobě dekorativními oděvy. Začaly se zdobit propracovanými zlatými a stříbrnými hedvábnými výšivkami, často zdobenými drahými kameny. Tyto rukavice byly elegantní, módní a drahé objekty touhy, které často pouze částečně sloužily jako ochranné prostředky. Také se začaly používat rukavice z tkaniny a pleteniny. Tyto typy rukavic ovšem nevyjadřovaly společenské postavení a prestiž, ale používaly se z praktických důvodů [4].

V osmnáctém století, důsledkem technického pokroku a nových forem módních šatů, začala spotřeba tkanin a pletených rukavic růst. Nižší náklady na výrobu umožnily zpřístupnit rukavice širší části populace. V devatenáctém století došlo k vývoji sociálních zvyklostí, které předepisovaly typy rukavic, které se mají nosit během konkrétních denních a večerních společenských akcí. Pokud se bohatý šlechtic objevil na veřejnosti bez rukavic v situaci, která je vyžadovala, stal se často terčem odsouzení nebo posměchu [4].

V ostrém kontrastu s předchozím stoletím bylo dvacáté století poznamenáno postupným zánikem společenského významu rukavic. Ačkoli technologický pokrok v produkci rukavic umožňoval jejich masovou výrobu v mnoha stylech a kombinacích, významné společenské otřesy po první světové válce hluboce ovlivnily způsob, jakým byly užívány. Po druhé světové válce přestaly existovat standardy etikety týkající se nošení rukavic, a proto se vysoce módní modely začaly považovat za zbytečné. V důsledku toho se rukavice vrátily k užitečnější roli jako ochranné prostředky [3].

## 1.2 Tepelná pohoda

Tepelná pohoda čili tepelný komfort, je definována jako pocitová spokojenost jedince s tepelným stavem, či tepelně vlhkostním mikroklimatem prostředí. Při látkových přeměnách probíhajících v lidském těle se uvolňuje tepelná energie – metabolické teplo, která se přenáší do okolí. Množství uvolňované energie závisí především na úrovni fyzické aktivity jedince a jeho hmotnosti. V závislosti na intenzitě aktivity člověka se část této energie využívá formou mechanické práce. Jedná se však pouze o nízké desítky procent. Zbytek energie je přenášen ve formě tepla, které musí být odváděno z těla do okolí.

### Faktory mající vliv na tepelný komfort: [5]

- Teplota vzduchu.
- Střední radiační teplota (teplota okolních povrchů).
- Vlhkost vzduchu.
- Rychlost proudění vzduchu.
- Tepelný odpor oděvu.
- Aktivita člověka a metabolismus.

Teplota vzduchu, střední radiační teplota, vlhkost a rychlost proudění vzduchu jsou ve venkovním prostředí dány a nemůžeme je ovlivnit. Poslední dva faktory ovšem závisí na volbě člověka a je důležité je sladit. Při vyšší fyzické aktivitě je potřeba volit oblečení s nižším tepelným odporem, aby bylo zajištěno dostatečné ochlazování těla bez použití aktivních termoregulačních mechanismů (vasodilatace, vasokonstrikce, mokré pocení) [1].

Tělesná teplota zdravého jedince se na povrchu těla pohybuje v rozmezí 35,8-37,3 °C. Při této teplotě je zaručena správná funkce tělesných orgánů. Pokud teplota lidského těla klesne pod teplotu 35 °C jedná se o podchlazení a pokud překoná teplotu 38 °C mluvíme o přehřátí organismu. Z tohoto důvodu musí být teplo generované v těle přenášeno do okolí [5].

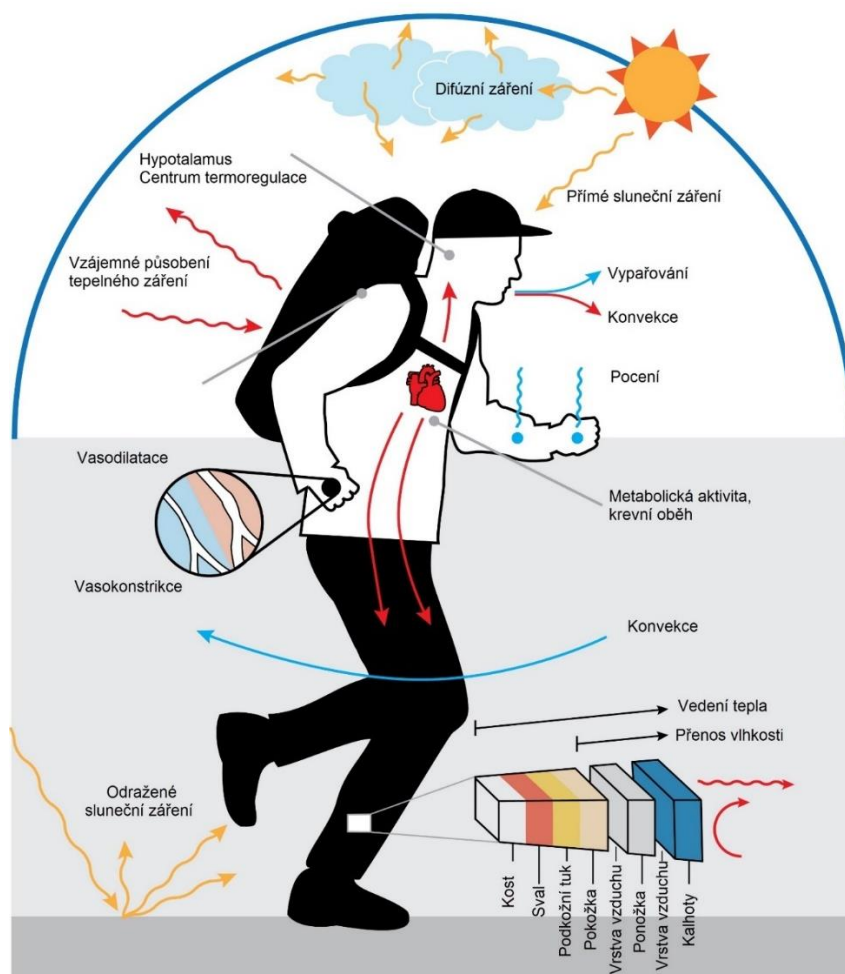
Níže uvedený Obrázek 1.1 popisuje kompletní proces přenosu tepla dle všech dále uvedených procesů. Tyto procesy dělíme na přímé a nepřímé.

### Přímé mechanismy přenosu tepla:

- Přenos tepla vedením (kondukce).
- Přenos tepla prouděním (konvekce).
- Přenos tepla zářením (radiace).

### Termofyziologické procesy ovlivňující přenos tepla:

- Vypařování vody (pocení a dýchání).
- Vasokonstrikce.
- Vasodilatace.



Obrázek 1.1: Přenos tepla z lidské organismu pomocí všech mechanismů [6]  
(přeloženo)

### 1.3 Přímé mechanismy přenosu tepla:

Všechny vzorce v podkapitole 1.3 jsou převzaty z [7].

#### 1.3.1 Přenos tepla vedením (kondukce)

Jedná se o přenos tepla v pevných tělesech z místa o vyšší teplotě do místa o nižší teplotě, při kterém částice látky v oblasti s vyšší střední kinetickou energií předávají část své pohybové energie prostřednictvím vzájemných srážek částicím v oblasti s nižší střední kinetickou energií. Částice se přitom nepřemísťují, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Při kondukcí nedochází k přenosu hmoty, ale pouze tepelné energie [5].

Kondukcí je popsána Fourierovým zákonem, který matematicky vyjadřuje hustotu tepelného toku rovnicí:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad } T [W \cdot m^{-2}] \quad (1.1)$$

Záporné znaménko vyplývá v této rovnici z toho, že tepelný tok proudí proti směru teplotního gradientu.

Tepelný tok:

$$\dot{Q} = \int_{(S)} \vec{q} \cdot dS [W] \quad (1.2)$$

kde:  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ].

grad T je největší změna teploty co do směru vztažená na jednotku délky [ $K \cdot m^{-1}$ ]

Platí:

$$grad T = \frac{dT}{dx} [K \cdot m^{-1}] \quad (1.3)$$

V případě hustoty tepelného toku jednorozměrnou stěnou nenastává problém s určením směru proudění tepla, a proto můžeme vzorec psát bez záporného znaménka.

Platí:

$$\dot{q} = \lambda \cdot \frac{(t_{st1} - t_{st2})}{\delta} [W \cdot m^{-2}] \quad (1.4)$$

kde:  $t_{st1}$ ,  $t_{st2}$  jsou teploty povrchu stěn [ $^{\circ}C$ ].

$\delta$  je tloušťka stěny [m].

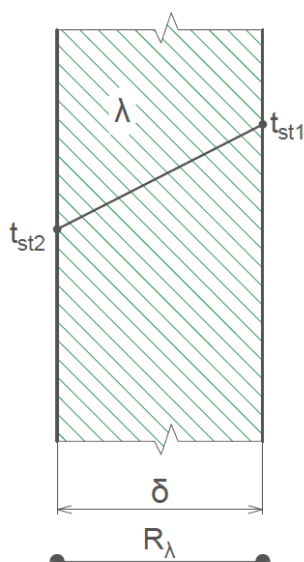
Ve složené rovinné stěně tvořené n vrstvami je hustota tepelného toku dána vztahem:

$$\dot{q} = \frac{(t_{st1} - t_{st2})}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} [W \cdot m^{-2}] \quad (1.5)$$

Člen  $\frac{\delta_i}{\lambda_i}$  je měrný tepelný odpor a dále jej budeme značit  $R_{\lambda}$  [ $m^2 K/W$ ] [1].

Rovnici (1.5) můžeme napsat v následujícím tvaru:

$$\dot{q} = \frac{(t_{st1} - t_{st2})}{\sum_{i=1}^n R_{\lambda i}} [W \cdot m^{-2}] \quad (1.6)$$



Obrázek 1.2: Vedení tepla jednou rovinnou plochou

Tepelné ztráty vedením tepla jsou většinou u lidského těla poměrně malé. Aby došlo k vysokým ztrátám vedením, musí být lidské tělo velkou částí svého povrchu v kontaktu s jinou plochou.

Většinu času je člověk v přímém kontaktu s jiným objektem pouze dolními končetinami, které bývají chráněné obuví. V chladném podnebí se člověk chrání proti chladu oblečením a pokud dojde k přímému kontaktu s jiným objektem, dochází k tepelným ztrátám vedením [1].

Rukavice, sloužící jako ochranná pomůcka vůči chladu, jsou ztrátě tepla kondukcí vystaveny v případě manipulace s chladnými tělesy. Tato diplomová práce se zabývá pouze ochranou lidského těla vůči konvekčnímu chladu a ne vůči chladu kontaktnímu. U mnoha lidských činností může být posouzení kvality rukavic dle jejich tepelného odporu vůči kontaktnímu chladu vhodnější. Metodami měření tepelného odporu rukavic se v obou případech zabývá norma ČSN EN 511.

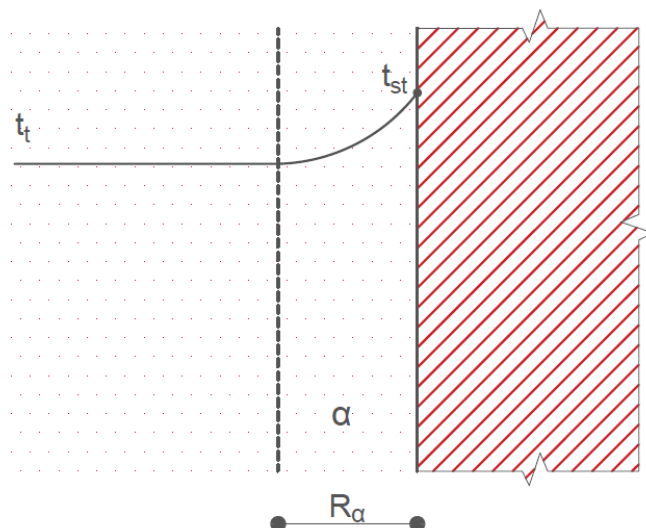
### 1.3.2 Přenos tepla prouděním (konvekci)

Konvektivní přenos tepla a hmoty probíhá jak difúzí, tak náhodným Brownovým pohybem jednotlivých částic v tekutině a advekcí, během níž se látka nebo teplo přenáší prouděním tekutiny. V souvislosti s přenosem tepla a hmoty se termín „konvekce“ používá k označení součtu advektivního a difúzního přenosu. Příčiny konvektivního přenosu tepla a hmoty rozlišujeme na přirozené a nucené [8].

K přirozené konvekci dochází z důvodu teplotních rozdílů, které ovlivňují hustotu vzduchu a tím jeho relativní vztlak. Vzduch s vyšší hustotou (chladnější) klesá, zatímco vzduch s nižší hustotou (teplejší) stoupá. Čím větší je rozdíl hustot, tím rychleji konvekce probíhá. Přirozená konvekce se může vyskytovat pouze v gravitačním poli.

Při nucené konvekci je pohyb tekutiny výsledkem působení vnějších povrchových sil např. ventilátor, čerpadlo či vítr. Nucená konvekce se obvykle používá ke zvýšení rychlosti výměny tepla.

V prostředí pouze s přirozenou konvekcí dochází ke vzniku tepelné mezní vrstvy okolo lidského těla, což je zobrazeno na Obrázek 1.4. Pokud rychlost proudění v okolí člověka přesáhne hodnotu 0,5 m/s, dojde k porušení mezní vrstvy a poté i k jejímu zániku.



Obrázek 1.3: Konvektivní přenos tepla mezní vrstvou

Hustotu tepelného toku při konvekci určíme z Newtonova ochlazovacího zákona:

$$\dot{q} = \alpha \cdot (t_{st} - t_t) [W \cdot m^{-2}] \quad (1.7)$$

Pro tepelný tok platí:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot S \cdot (t_{st} - t_t) [W] \quad (1.8)$$

kde:  $\alpha$  je součinitel přestupu tepla [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ].

$t_{st}$  je teplota stěny [ $^{\circ}C$ ].

$t_t$  je teplota tekutiny v dostatečné vzdálenosti od stěny [ $^{\circ}C$ ].

$S$  je velikost teplosměnné plochy [ $m^2$ ].

Člen  $\frac{1}{\alpha}$  je měrný tepelný odpor a dále jej budeme značit  $R_\alpha$  [ $m^2 K/W$ ].

Platí:

$$\dot{q} = \frac{(t_{st} - t_t)}{R_\alpha} [W \cdot m^{-2}] \quad (1.9)$$



Obrázek 1.4: Přirozená konvektivní hraniční vrstva okolo člověka při stání, vsedě a vleže [9]

### 1.3.3 Přenos tepla zářením (radiace)

V oblasti mírného podnebného pásu se jedná o nejvýznamnější faktor ztráty tepla. Tvoří až 60 % celkových tepelných ztrát. Organismus jako hmotný objekt o teplotě vyšší, než je hodnota absolutní nuly, vyzařuje do okolí tepelné elektromagnetické záření. Infračervené záření o vlnové délce 5–20  $\mu\text{m}$  je u lidského organismu nejvýznamnější. Množství vyzážené energie je u absolutně černého tělesa dle Stefan-Boltzmanova zákona přímo úměrné čtvrté mocnině jeho absolutní teploty [10].

$$E_0 = \sigma \cdot T^4 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1.10)$$

kde:  $E_0$  je intenzita vyzařování dokonalé černého tělesa [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ].  
 $\sigma$  je Stefan-Boltzmanova konstanta,  $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$ .  
 $T$  je termodynamická teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ].

U šedých těles je třeba znát jejich emisivitu  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} [-] \quad (1.11)$$

kde:  $E$  je intenzita vyzařování šedého tělesa [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ].

I okolní tělesa působí radiací na lidský organismus. Celková vyzážená energie je dána rozdílem čtvrtých mocnin povrchové teploty lidského těla a teploty těles v jeho bezprostředním okolí.

$$\dot{Q}_{12} = \varepsilon_{1,2} \cdot \sigma \cdot S \cdot [T_1^4 - T_2^4] \text{ [W]} \quad (1.12)$$

kde:  $\varepsilon_{1,2}$  je emisivita mezi člověkem a jiným tělesem [-].  
 $T_1$  je povrchová teplota člověka [ $^{\circ}\text{C}$ ].  
 $T_2$  je teplota tělesa [ $^{\circ}\text{C}$ ].



Platí:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (1.13)$$

S radiací přímo souvisí i tzv. tepelná pohoda člověka ve vnitřním prostředí, na níž má vliv jak teplota vzduchu v místnosti, tak i teplota povrchu stěn.

Tato diplomová práce navazuje na práci Pidrové [1] a měření byla provedena dle normy ČSN EN 511. Výpočet tepelných ztrát radiací není v této práci zpracován samostatně, protože jeho určení by bylo obtížné a je již teoreticky zahrnut do celkového výpočtu tepelného odporu rukavic dle normy.

## 1.4 Termofyziologické procesy ovlivňující přenos tepla

V této kapitole jsou popsány jednotlivé termofyziologické procesy zajišťující termoregulaci lidského těla.

### 1.4.1 Vypařování vody

K vypařování vody dochází při respiraci (dýchání) a evaporaci. Při respiraci je vydechaný vzduch téměř zcela nasycen vodní parou. Evaporaci rozlišujeme na znatelnou a neznatelnou.

Neznatelná evaporace (suché pocení) je lidským organismem téměř neregulovaný proces samovolné difúze vody pokožkou bez účasti potních žláz, který záleží zejména na vnějším prostředí (teplota, relativní vlhkost, rychlost proudění vzduchu apod.) Neznatelnou evaporací ztrácí lidský organismus za normálních podmínek přibližně 0,7 litru vody denně [10].

Znatelné (mokré) pocení, tzn. evaporace za účasti potních žláz, je energeticky významnější. Ztráta vody může za extrémních podmínek činit až 1,5 litru za hodinu. Znatelná evaporace je organismem regulována, její účinnost je znatelně ovlivněna vlastnostmi okolního prostředí. Jedná se o základní mechanismus odvodu tepla z lidského organismu za podmínek, kdy vysoká teplota prostředí jiný způsob ochlazování neumožňuje [10].

### 1.4.2 Vasokonstrikce a vasodilatace

Pokud jsou končetiny vystaveny extrémnímu chladu, je počáteční odezvou lidského organismu silná vasokonstrikce, která vede k rychlému poklesu teploty rukou a nohou na úroveň danou výslednou bilancí mezi tepelným tokem z těla a množstvím tepla odváděným do okolí. Čím vyšší je tok odváděný do okolí, tím nižší je i výsledná povrchová teplota. Vasokonstrikce je dosaženo zúžením cév způsobené kontrakcí jejich stěn a snížením průtoku krve. V důsledku toho, dochází ke zhoršení hmatové citlivosti, zručnosti, kontrakci svalů a zároveň je jedinec vystaven zvyšující se bolesti. Proto je nutné chránit ruce kvalitními rukavicemi, vhodnými pro dané prostředí. Vasokonstrikce je během hypotermie (podchlazení) dostatečně silná, aby snížila tok tepla končetinou na hodnotu menší než 0,1 W/m<sup>2</sup>. Prioritou lidského organismu je co nejdéle udržet fyziologicky potřebnou teplotu jádra (trup, vnitřní orgány) [2].

Vasodilatace je opakem vasokonstrikce, dochází při ní k rozšíření cév a zvýšení průtoku krve. Díky těmto procesům fungují ruce a nohy jako silné termoregulační orgány, které slouží jako tepelné zářiče či výparníky v horkém prostředí a jako tepelné izolátory v chladném. Každá končetina může konvekci a radiací uvolnit v klidu při teplotě vzduchu 27 °C až 150-220 W/m<sup>2</sup>. Tato tepelná ztráta může být ještě navýšena mokrým pocením [2].

## 1.5 Centrální regulace tělesné teploty

Regulace tělesné teploty je řízena zejména prostřednictvím nervových center, která jsou částí mozku zvané přední a zadní hypotalamus a souhrnně je označujeme jako termoregulační centra.

### Přední hypotalamus

Přední hypotalamus slouží jako fyziologický termostat. Nachází se v něm velké množství termosenzitivních neuronů. Dvě třetiny termosenzitivních neuronů (teplo-senzitivní neurony) reagují na teplo, jedna třetina reaguje na chlad (chlad-senzitivní neurony). Tyto neurony jsou stimulovány teplotou krve, která přes ně protéká. Pokud se liší od předpokládané teploty jádra, začíná přední hypotalamus regulovat teplotu těla [11].

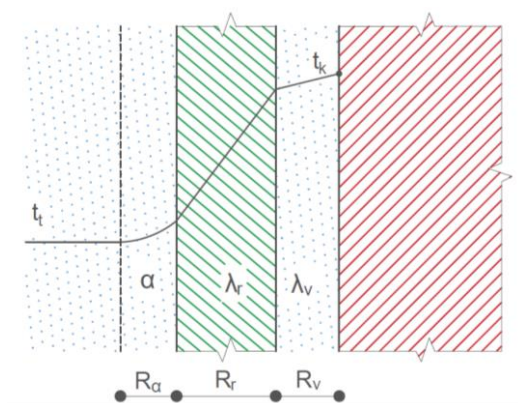
### Zadní hypotalamus

Do zadního hypotalamu přicházejí signály z periferních termoreceptorů. Tyto receptory jsou difúzně rozmístěny v kůži celého těla a rozdělujeme je na chladové a tepelné. V kůži se nachází asi desetkrát více chladových receptorů než tepelných. Větší počet chladových receptorů pravděpodobně pramení z evolučně získané potřeby včas odhalit hrozící hypotermii (podchlazení) [11].

Zadní hypotalamus tyto informace sbírá a spojuje je s informacemi z chlad-senzitivních a teplo-senzitivních neuronů předního hypotalamu. Tím získává ucelený přehled o aktuálních ziscích, či ztrátách tepla, stejně tak o průběhu termoregulačních procesů.

## 1.6 Tepelný odpor rukavic

Celkový tepelný odpor je složen z tepelného odporu tenké vrstvy vzduchu  $R_v$  [ $m^2K/W$ ] mezi kůží o teplotě  $t_k$  a rukavicemi, samotného tepelného odporu rukavic  $R_r$  [ $m^2K/W$ ] a tepelného odporu mezní vrstvy  $R_\alpha$  [ $m^2K/W$ ].



Obrázek 1.5: Prostup tepla přes rukavici a mezní vrstvu

Pro hustotu tepelného toku platí:

$$\dot{q} = \frac{(t_k - t_t)}{R_\alpha + R_r + R_v} [W \cdot m^{-2}] \quad (1.14)$$

Teplo prostupuje tenkou vrstvou vzduchu mezi rukavicí a pokožkou, která zvyšuje celkový tepelný odpor rukavic, protože vzduch má dobré izolační vlastnosti. Stejnou funkci mají molekuly vzduchu vyskytující se v samotné tkanině a mezi jednotlivými vrstvami rukavic. Celkový odpor rukavic můžeme tedy shrnout do jedné proměnné:

$$R_R = R_r + R_v [m^2K/W] \quad (1.15)$$

Povrch rukavice je ochlazován prouděním vzduchu a dochází zde ke konvektivnímu přestupu tepla mezní vrstvou o odporu  $R_\alpha$ .

Celkový tepelný odpor můžeme shrnout do jedné proměnné  $R_C$ .

platí:

$$R_C = R_R + R_\alpha [m^2K/W] \quad (1.16)$$

Po dosazení vzorce (1.16) do rovnice (1.14) můžeme psát rovnici hustoty tepelného toku:

$$\dot{q} = \frac{(t_k - t_t)}{R_C} [W \cdot m^{-2}] \quad (1.17)$$

Celkový tepelný odpor rukavic lze tedy vyjádřit:

$$R_C = \frac{(t_k - t_t)}{\dot{q}} [W \cdot m^{-2}] \quad (1.18)$$

## 2 KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY RUKAVIC

V současné době výrobci sportovního oblečení a rukavic šijí své oblečení z více vrstev funkčních materiálů, z nichž každá slouží k jinému účelu.

Svrchní vrstva je tvořena odolným materiálem, který chrání další vrstvy rukavice před poškozením a také tvoří design výrobku. Zároveň je většinou v této vrstvě umístěna voděodolná membrána zabraňující proniknutí vody do dalších vrstev a zároveň velmi dobře odvádějící vodní páru vzniklou pocením [12].

Střední vrstva je tvořena ve většině případů izolačním materiálem s vysokou hodnotou tepelného odporu, který udržuje člověka v teple a chrání jej proti chladu. I tato vrstva musí být dobře prodyšná, aby zde nedocházelo ke kondenzaci vodní páry vzniklé pocením [12].

Spodní sací vrstva rukavice je v přímém kontaktu s kůží. Jejím úkolem je odvod potu k dalším vrstvám a udržení pokožky v suchu a teple [12].

Mezi pokožkou i jednotlivými vrstvami materiálů je vzduch, který zlepšuje izolační vlastnosti dané kombinace materiálů.

Vrstvení materiálů nemusí být užito pouze u jednoho výrobku, ale lze jej využít také modulárně v kombinaci s dalšími kusy oblečení či rukavic.



Obrázek 2.1: Modulární systém sportovního oblečení [12] (přeloženo)

## 2.1 Modularita rukavic

Modularita rukavic je založena na principu vrstvení různých funkčních kusů oděvu. Díky vrstevní rukavic je možné regulovat tepelný odpor systému rukavic dle povětrnostních podmínek a úrovně aktivity.

Jako příklad lze uvést vojáka v mrazivých podmínkách, který je na hlídce v zákopu a je bez ochrany vystaven povětrnostním podmínkám. Na ruku má tři páry rukavic:

- Tenké, lehce zateplené podvlekové rukavice.
- Střední, mírně zateplené rukavice.
- Velmi dobře zateplené převlekové rukavice.

Povětšinu času pouze stojí, pozoruje přidělený sektor a minimálně se pohybuje. Za těchto podmínek má na sobě celý modulární systém, který mu poskytuje maximální ochranu před chladem, ale jeho jemná motorika je velmi omezena.

V případě, že potřebuje manipulovat se svou zbraní nebo použít nějaký přístroj či nástroj, si sundá nejtlustší převlekové rukavice. Po několik desítek minut je schopen provádět požadované úkony se zvýšenou mobilitou při zachování dostatečného tepelného odporu dvoj systému.

Další možností, kterou voják má, je sundat si i střední rukavici a chránit své ruce pouze tenkou, podvlekovou rukavicí, která může být vyrobena i z umělé vodivé kůže. Tento materiál mu umožní např. ovládat dotykové displeje různých přístrojů určených k navigaci či komunikaci. V těchto tenkých rukavicích je jemná motorika rukou téměř stejně dobrá jako bez jakékoliv ochrany, přičemž mu stále poskytují určitou tepelnou ochranu a po několik minut je bez omezení schopen plnit zadaný úkol.

Tyto modulární systémy naleznou uplatnění nejen u armády, ale i např. u alpinistů či vysokohorských horolezců, kteří mohou v závislosti na povětrnostních podmínkách, etapě a náročnosti výstupu volit správnou kombinaci rukavic.

## 2.2 Voděodolné a prodyšné membrány

Podkapitola 2.2 je zpracována na základě [13].

Voděodolné a prodyšné tkaniny se začaly poprvé vyrábět v roce 1978, kdy byl na trh uveden laminát (vrstvená tkanina) značky Gore-Tex. V současnosti je na trhu mnoho dalších laminátů (např. Porelle, eVent, Sympatex, MemBrain Strata, atd.), ale většina spotřebitelů stále označuje celou kategorii voděodolných a prodyšných membrán jako Gore-Tex.

**Tyto tkaniny jsou navrženy tak, aby dobře plnily dva požadavky:**

- Zabránění proniknutí kapalně vody (udržují člověka a další vrstvy oblečení suché).

- Zajištění dobrého odvodu potu a vypařující se vlhkosti z těla člověka (umožňují tělu se průběžně ochlazovat pomocí mokrého pocení a tím udržují vhodnou teplotu těla i za deštivých podmínek).

Tyto vlastnosti jsou zajištěny vhodnou kombinací materiálů tvořící laminát a vnější i vnitřní ochrannou vrstvu.

Nejdůležitější součástí laminátu je prodyšná membrána, která je nejčastěji vyrobena z těchto materiálů:

- Expandovaný polytetrafluoretylen (teflon) – ePTFE
- Polyuretan – PU
- Polyester – PES

### **Expandovaný polytetrafluoretylen – ePTFE**

U Gore-Texu a eVentu, je membrána tvořena ePTFE. ePTFE membrána má mikroskopickou „pavoučí“ strukturu, jejíž tloušťka je 10 mikronů.

Výrobce Gore-Texu uvádí, že jeho ePTFE membrána obsahuje cca 1,4 miliardy pórů na centimetr čtvereční. I přes všechny tyto mikroskopické póry je ePTFE hydrofobní. Kapka vody je cca 20 000krát větší, než je velikost tohoto póru, a proto skrz něj nemůže projít. Naopak velikost molekuly páry je cca 700krát menší a projde membránou bez problému [14].

Dalším faktem je, že ePTFE membrána má nízké povrchové napětí a vodou nemůže být smáčena. Molekuly vody mají vysokou povrchovou energii a při kontaktu s membránou jsou odpuzovány a přitahovány k ostatním kapkám vody. Díky tomu velmi rychle utvoří téměř kulové kapky a ty sklouznou z povrchu.

### **Voda může proniknout ePTFE membránou pouze dvěma způsoby:**

1. Při působení vysokého tlaku, kterého však obvykle není při dešti dosaženo.
2. Zvýšením povrchového napětí membrány v důsledku kontaminace (způsobena nečistotami, potem, opalovacím krémem či repelentem proti hmyzu).

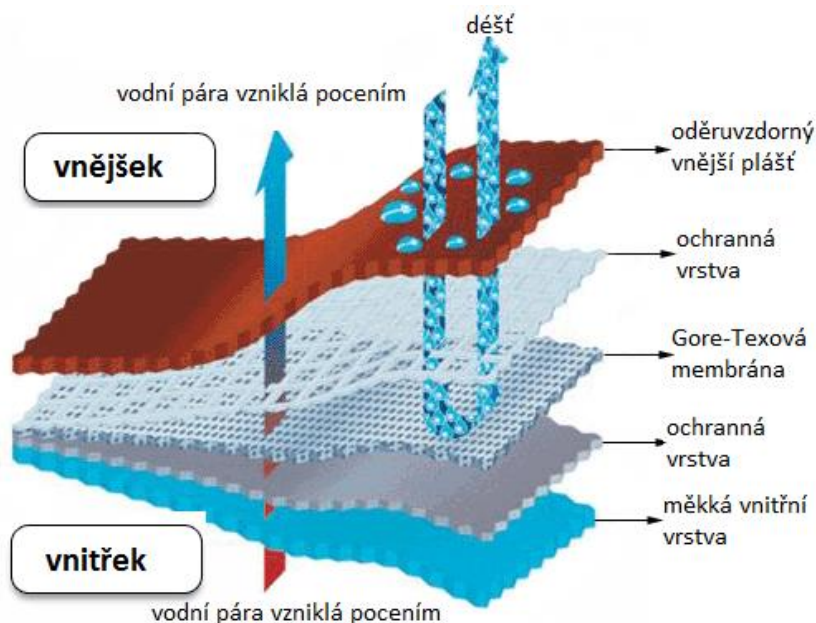
Způsob, jak chránit ePTFE před kontaminací je přidáním další oleji vzdorné vrstvy. U Gore-Texu je membrána chráněna tenkou monolitickou polyuretanovou (PU) vrstvou, se kterou tvoří dvousložkový laminát [14].

Tato polyuretanová vrstva je hydrofilní (přitahuje vodu). Této vlastnosti je dosaženo zavedením funkční chemické skupiny, nebo kombinací PU s jinými hydrofilními polymerními materiály, např. polyethylen oxid.

Během pocení jsou molekuly páry přitahovány k hydrofilnímu povrchu PU vrstvy a na jejím povrchu dojde k jejich zachycení (adsorpci). Tyto molekuly vodní páry postupně procházejí v důsledku difúze PU vrstvou. Jakmile jsou na vnější straně PU vrstvy dochází k jejich odpaření a posléze unikají skrz ePTFE membránu desorpcí.



Tento adsorpčně-desorpční proces zajišťuje prodyšnost celého laminátu. Je ovšem pomalejší než v případě nechráněné ePTFE membrány. V některých případech se může na vnitřní straně PU vrstvy hromadit vlhkost a následně kondenzovat. Funkční schéma membrány je na Obrázek 2.2.



Obrázek 2.2: Schéma membrány Gore-Tex [15]

### Polyuretan – PU

Zvyšující se množství tkanin používá membránu tvořenou pouze tenkou vrstvou polyuretanu. Jedná se o stejný hydrofilní materiál, jaký je použit v laminátu Gore-Tex pro vytvoření ochranné vrstvy spojené s ePTFE membránou. Samotná PU vrstva má stejnou voděodolnost a prodyšnost jako ve spojení s ePTFE.

Její samostatné použití je v současné době omezenou nutnou tloušťkou vrstvy. Rozdíl v její tloušťce je pouze v mikrometrech, ale i takto malá odchylka má vliv na její schopnosti a pocit uživatele při nošení. V současné době pracují výrobci na zdokonalení této technologie a uvádí ji postupně na trh, např. laminát MeBrain Strata od značky Marmot. Proces odvodu vodní páry je stejný jako ve výše uvedeném případě.

### Polyester – PES

Tento materiál není zatím široce používán, avšak polyesterové membrány jsou postupně rozvíjející se kategorií voděodolných a prodyšných membrán.

Nejznámějším příkladem je Sympatex, který kombinuje dvě látky – polyester (hydrofobní) a polyether (hydrofilní), aby vytvořil hydrofilní vrstvu. Tato vrstva odvádí vlhkost pomocí kombinace adsorpce-difúze-desorpce stejně jako u ePTFE a PU membrán.

V prodyšnosti zatím mírně zaostává za nejlepšími PU lamináty, přesto tyto membrány nabízejí velkou výhodu – udržitelnost. Opotřebované mohou být recyklovány, pokud jsou nalepeny na recyklovatelnou polyesterovou textilii.

### **Vodoodpudivá impregnace**

Všechny lamináty jsou z vnějšku ošetřeny vodoodpudivou impregnací, která je tvořena fluorovanými polymery (polytetrafluoretylen – PTFE). Tyto polymery na bázi fluorovaného uhlovodíku jsou charakterizovány vysokou odolností vůči rozpouštědlům, kyselinám a zásadám [16].

#### **Vlastnosti impregnace: [16]**

- Je nanесena z vnějšku vrstvené tkaniny a není její přímou součástí.
- Jejím cílem je chránit tkaninu před zvlhnutím a ztěžknutím.
- Impregnace snižuje povrchové napětí tkaniny. Voda dopadající na její povrch rychle tvoří kapičky a sklouzává pryč z jejího povrchu.
- Nemá vliv na prodyšnost samotné membrány.
- Kvalita impregnace je negativně ovlivněna oděrem, znečištěním povrchu tkaniny (např. mastnota) a v menší míře také praním.
- Pro zachování optimální účinnosti, musí být tkanina pravidelně čistěna a její impregnace obnovována.



Obrázek 2.3: Kapka vody na správně ošetřeném povrchu tkaniny [16]

Firma Holík International používá membránu značky Porelle, jež je vysoce prodyšná, voděodolná a vytváří bariéru vůči bakteriím, krvi a chemickým látkám. Tato membrána je vyrobena kombinací dvou materiálů PTFE a PU. Každou vyrobenou rukavici zkouší vlastním patentovaným strojem sloužícím k testování integrity membránových vložek v hotových rukavicích. Zařízení je schopno otestovat rukavici a určit, zda je membrána neporušena. Zařízení funguje na principu detekce děr a jiných materiálových defektů, které mohly vzniknout při výrobě membrány, ale zejména při výrobě rukavice [17].



## 2.3 Další materiály použité v konstrukci rukavic

### Nomex

Nomex je obchodní značkou ohnivzdorného meta-aramid polymeru vyvinutého počátkem 60. let firmou DuPont. Jedná se o materiál podobný nylonu.

Je používán pro výrobu oblečení a vybavení, které vydrží intenzivní teplo. Všechny aramidy jsou tepelně odolné a ohnivzdorné, avšak Kevlar, polymer s para-aramid orientací, může být molekulárně narovnan a poskytuje tak zároveň vysokou pevnost. Meta aramid nemůže být při tvorbě filamentů narovnan a má tudíž nízkou pevnost [18].

### Vlastnosti Nomexu [19]

- Excelentní tepelná odolnost.
- Ohnivzdornost.
- Dobrá odolnost proti většině organickým rozpouštědlům.
- Při přímém kontaktu s plamenem karbonizuje, neodkapává.
- Má až 3x větší mechanickou odolnost než bavlna.
- Vysoká odolnost proti otěru.
- Excelentní odolnost proti plísním.
- Významně vyšší dlouhodobá tepelná odolnost v porovnání s Kevlarem.

### Duté vlákno – Primaloft (izolace)

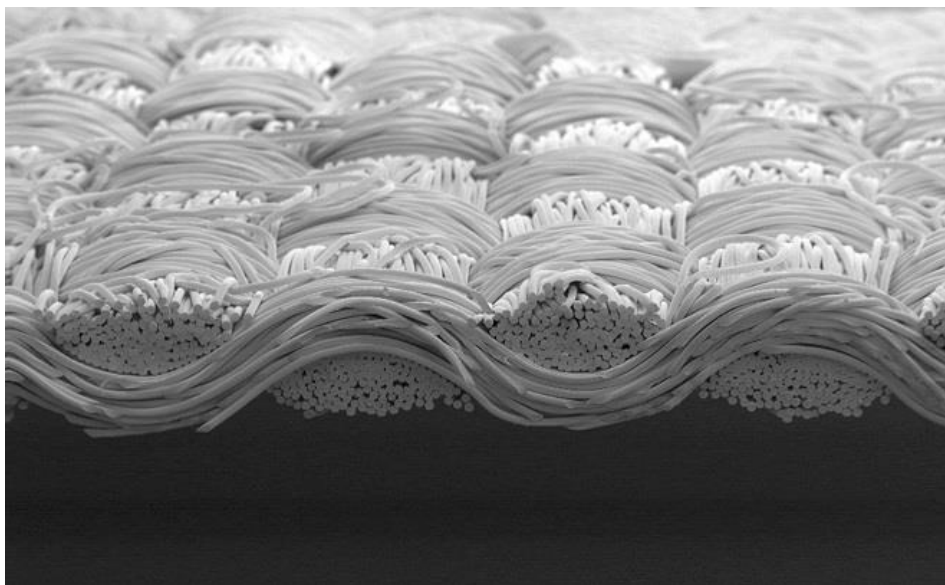
Průřez vláken použitých v izolačních materiálech, má velký vliv na charakteristiku tepelné izolace, jakou tento materiál poskytuje. Čím více vzduchu je ve vláknech obsaženo, tím lepší jsou jeho tepelně-izolační vlastnosti. Této vlastnosti využívají tkaniny ušité z dutých vláken, u kterých je množství vzduchu fixovaného v materiálu vyšší než u plných vláken [20].

Primaloft je jedním z těchto materiálů, který se v současnosti využívá pro výrobu sportovního vybavení i rukavic. Je vyráběn ve dvou provedeních, buď jako 100% polyester – PES, nebo jako kombinace 45% polyesteru a 55% merino vlny.

Tento materiál má při stejné hustotě podobné izolační vlastnosti jako prachové peří, je lépe stlačitelný, méně se smáčí a rychleji schne. Jeho hlavní výhodou je ovšem fakt, že i při zvlhnutí či namočení je jeho tepelná kapacita snížena pouze o 4 % a stále velice dobře izoluje [21].

## **Cordura**

Pevná a odolná tkanina z texturovaných polyamidových vláken, které se vyznačují pevností a odolností vůči otěru a jiným mechanickým rizikům poškození. Jedná se o obchodní označení nylonu 6,6. Struktura vláken a sofistikovaná metoda tkaní má za následek skutečnost, že výrobky z Cordury jsou odolnější než standardní nylon [22].



Obrázek 2.4: Struktura materiálu Cordura [22]

### 3 METODIKA MĚŘENÍ

Měření proběhlo dle metodiky definované v normě ČSN EN 511 [23] za dodržení podmínek pro měření tepelných izolací pomocí tepelné figuríny definovaných v normě ČSN EN ISO 15831 [24]. V druhé zmíněné normě je uvedeno, že u každého testovaného vzorku musí proběhnout alespoň dvě samostatné zkoušky (levá a pravá rukavice). V případě, že rozdíl mezi měřeními je vyšší než 4 %, je potřeba provést další měření. V této diplomové práci byly, v případě nesplnění výše uvedeného kritéria, oba (levá a pravá rukavice) vzorky znovu změřeny.

#### 3.1 Metodika dle norem ČSN EN 511 a ČSN EN ISO 15831

Norma ČSN EN 511 [23] je detailně popsána v diplomové práci Pidrové [1]. Z tohoto důvodu je zde norma pouze stručně zpracována s důrazem na metodiku měření, podle níž měření proběhlo.

##### 3.1.1 Norma ČSN EN 511 „Ochranné rukavice proti chladu“

Celá podkapitola 3.1.1 je rešerší normy [23] a není dále v textu citována.

Jedná se o českou verzi evropské normy EN511:2006. Vzorky rukavic zkoušené dle této normy musí splňovat požadavky normy ČSN EN 420 „Ochranné rukavice – Všeobecné požadavky a metody zkoušení“ a splnit zkoušky na chování při ohybu, mechanické vlastnosti, propustnost vody a v případě návrhu rukavic určených pro použití při teplotách nižších než  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  také splnit zkoušku flexibility při extrémním chladu.

Dále jsou v normě specifikovány požadavky na jednotlivé zkoušky:

- Chování při ohybu.
- Propustnost vody.
- Zkouška flexibility při extrémním chladu.
- Konvekční chlad.
- Kontaktní chlad.

V této práci byly rukavice testovány pouze zkouškou na konvekční chlad.

##### 3.1.1.1 Metoda testování konvekčního chladu

Rukavice musí být uloženy v testovacím prostředí nejméně 24 hodin před samotným testem. Vzorek rukavice musí být velikosti č. 9.

Tepelný odpor rukavice  $R_R$  je stanoven měřením příkonu, který je nutný pro udržení konstantního teplotního gradientu mezi celým povrchem ruky tepelného manekýna a okolním prostředím. Maximální odchylka střední teploty ruky je  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Příkon ruky musí být dostatečně vysoký, aby udržel průměrnou teplotu ve všech oblastech v intervalu  $30\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$  při teplotě okolí nižší minimálně o  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Zkušební zařízení je tvořeno:

- Modelem ruky (tepelným manekýnem).
- Klimatickou komorou.
- Měřicím zařízením.

Detailně je zkušební zařízení popsáno v příloze A normy [23] a v diplomové práci Pidrové [1].

### Třídy tepelné izolace rukavic

V normě je uvedena tabulka tříd tepelné izolace neboli tepelného odporu. Rukavice musí uvedené hodnoty splňovat, aby mohly být zařazeny do dané třídy. U tříd provedení 2 až 4 musí rukavice dosáhnout při zkoušce oděru a testu odolnosti proti dalšímu trhání, dle normy EN 388, alespoň třídu provedení 2. Pokud testovaný výrobek požadované třídy provedení u těchto zkoušek nedosáhne, nemůže být hodnocen lépe než třídou provedení 1 u zkoušky konvekčního chladu.

Tabulka 3.1: Rozdělení tříd tepelné izolace

Třída provedení [–]	Tepelná izolace $I_{TR} [m^2 \cdot K/W]$
1	$0,10 \leq I_{TR} < 0,15$
2	$0,15 \leq I_{TR} < 0,22$
3	$0,22 \leq I_{TR} < 0,30$
4	$0,30 \leq I_{TR}$

### Postup zkoušky

Model ruky s oblečenou zkoušenou rukavicí je umístěn v klimatické komoře prsty kolmo dolů do zkušebního prostoru.

Teplota okolí je v klimatické komoře alespoň o 20 °C nižší než teplota, na kterou je vyhříván povrch modelu ruky. Rychlost proudění vzduchu je udržována na hodnotě  $4 \pm 0,5$  m/s a relativní vlhkost je upravena na  $50 \pm 5$  %RH. Jakmile dojde k ustálení teploty ruky a příkonu, je v desetiminutových intervalech prováděno měření střední hodnoty.

Hodnotu tepelné izolace vypočítáme dle vzorce:

$$I_{TR} = \frac{T_{HAND} - T_A}{Q_{HAND}} [m^2 K/W] \quad (3.1)$$

kde:  $I_{TR}$  je odolnost proti suché tepelné ztrátě ruky, ve které je obsažena odolnost poskytovaná oblečenou rukou a vzduchovou vrstvou kolem oblečeného modelu ruky [ $m^2 K/W$ ].

$T_{HAND}$  je střední teplota povrchu měřené oblasti ruky [°C].

$T_A$  je střední teplota vzduchu v klimatické komoře [°C].

$Q_{HAND}$  je změřené množství energie dodané do měřené oblasti ruky během ustáleného stavu [ $W/m^2$ ].

### 3.1.2 Norma ČSN EN ISO 15831 „Oděvy – Fyziologické účinky – Měření tepelné izolace pomocí tepelné figuríny“

V požadavcích této normy [24] je uvedeno, že u každého testovaného vzorku musí proběhnout alespoň dvě samostatné zkoušky (levá a pravá rukavice). V případě, že rozdíl mezi měřeními je vyšší než 4 %, je nutné provést další měření.

Povrchová teplota povrchu měřené oblasti ruky musí být udržovaná v intervalu  $T_{HAND} = 34 \pm 0,2^{\circ}C$ .

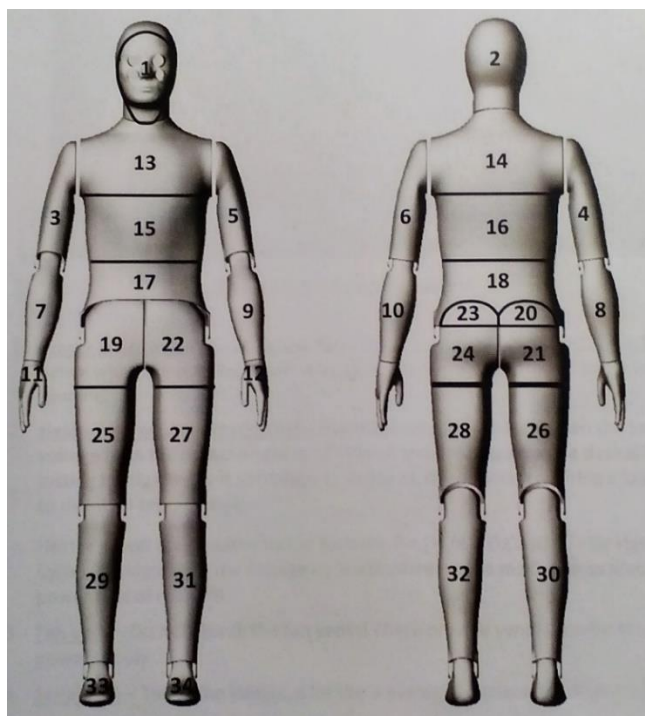
Tepelný tok každou částí musí dosahovat minimální hodnoty  $\dot{q} = 20 W/m^2$ .

## 3.2 Popis využitého měřicího zařízení

V této kapitole je popsáno využití měřicího zařízení. Jedná se o tepelného manekýna Newtona, klimatickou komoru a multifunkční měřič Testo 435.

### 3.2.1 Tepelný manekýn Newton

Veškerá měření byla provedena na tepelném manekýnovi Newtonovi vyrobeném společností Thermetrics (dříve Measurements technology Northwest), který je dodáván včetně softwaru ThermDAC 8, pomocí kterého lze manekýna nastavit na požadované hodnoty jednotlivých parametrů, zaznamenávat data a v reálném čase je graficky vizualizovat. Každá ze 34 zón manekýna je ovládaná pomocí tohoto softwaru separátně. Tyto zóny jsou také nezávisle na sobě vyhřívány.



Obrázek 3.1: Rozdělení zón na tepelném manekýnovi Newtonovi [25]

### Manekýn může být použit ve 3 různých režimech řízení [25]:

- **Na konstantní teplotu (tento režim byl použit).**
  - Každá zóna je nastavena na danou teplotu.
  - Měříme tepelný tok nutný k udržení této teploty a poté vypočteme tepelný odpor.
  - Teplota všech zón by měla být nastavena na stejnou hodnotu.
- **Na konstantní tepelný tok.**
  - Zadaný tepelný tok je udržován všemi zónami.
- **Komfortní režim.**
  - Slouží k určení tepelné ztráty povrchem manekýna a okolním prostředím.
  - Vhodný pro měření komfortních diagramů.

### Technické parametry [26]:

- Tvar průměrné lidské postavy.
- Měření v rozsahu okolních teplot -20 až +50 °C.
- 34 nezávisle regulovatelných zón.
- 34 nezávisle měřitelných zón – povrchová teplota, tepelný tok.
- Dvě čidla teploty vzduchu.
- Čidlo relativní vlhkosti.
- Čidlo pro měření rychlosti vzduchu.
- Dýchací mechanismus.
- Filtrační zařízení pro monitoring vdechovaných částic.

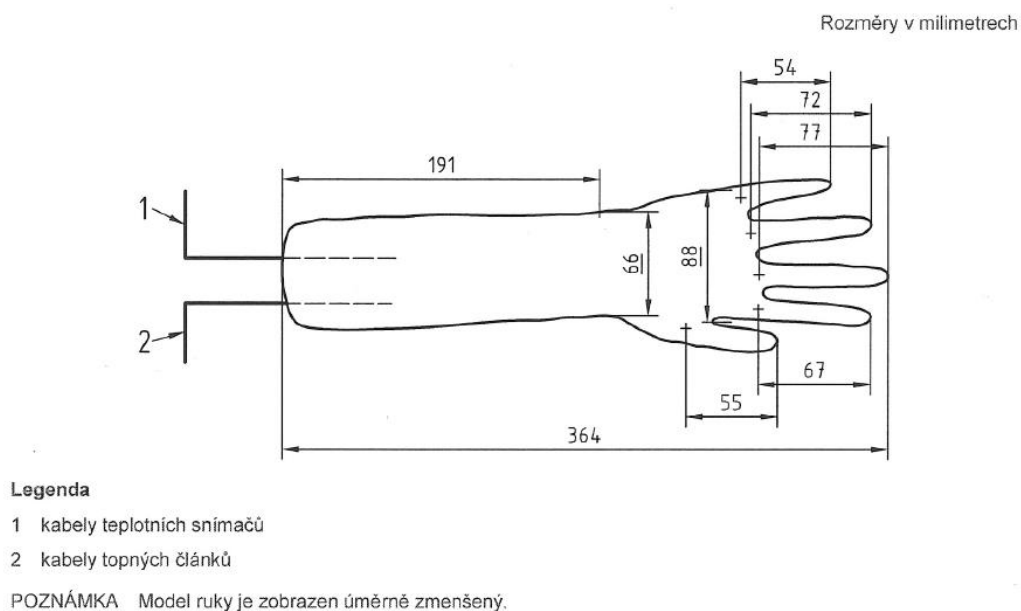


Obrázek 3.2: Tepelný manekýn Newton s kompletní výbavou [26]

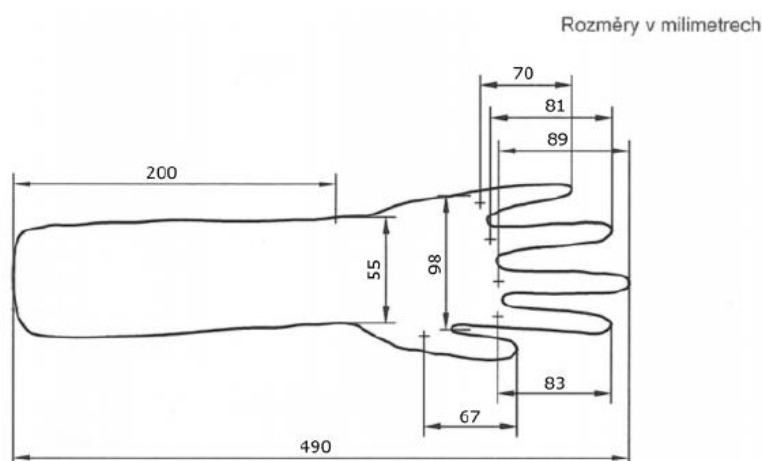
Při měření byla použita obě čidla pro měření teploty vzduchu a čidlo pro měření relativní vlhkosti.

### Velikost ruky manekýna a její náčrtek v normě ČSN EN 511

Jak již uvedla ve své diplomové práci Pidrová [1], panuje neshoda mezi velikostí ruky manekýna a náčrtem v normě. Norma vyžaduje velikost ruky č. 9, čemuž rozměry ruky tepelného manekýna Newtona odpovídají, avšak v náčrtu v normě je vyobrazena ruka s rozměry odpovídající velikosti modelu ruky č. 7. Pravděpodobně se jedná o chybně uvedený obrázek.



Obrázek 3.3: Model manekýnovy ruky dle ČSN EN 511 [23]



Obrázek 3.4: Změřené rozměry modelu ruky manekýna Newtona [1]

### 3.2.2 Klimatická komora

Ode dne 8. 10. 2013 je součástí přístrojového vybavení Fakulty strojního inženýrství i klimatická komora, jež byla dodána italskou firmou Angelatoni Industrie S.P.A. Tato komora umožňuje napodobit vnější atmosférické vlivy či klimatické podmínky dle zadání testu. Řízena je teplota a vlhkost vzduchu, je možné simulovat i sluneční záření. Její rozměry jsou 5 m (šířka), 8,85 m (délka) a 3,8 m (výška). Její vnitřní objem je 152 m<sup>3</sup>.

FSI využívá této komory pro níže uvedené typy testů ve spolupráci s řadou firem, např. firmou Holík International s.r.o. či Škoda Auto a.s.



Obrázek 3.5: Klimatická komora na FSI VUT [27]

#### Typy prováděných zkoušek: [27]

- **Životnostní zkoušky výrobků:**
  - Automobily a jejich jednotlivé díly.
  - Fotovoltaické panely.
  - Solární kolektory.
  - Chladicí boxy.
  - Tepelná čerpadla.
- **Testy funkčnosti:**
  - Klimatizace.
  - Vytápěcí systémy.
  - Chladicí boxy.
- **Testování a výzkum lidského tepelného komfortu (v kombinaci s tepelným manekýnem).**



Tabulka 3.2: Základní technické parametry klimatické komory [27]

Veličina	Hodnota	Jednotka
Výměna vzduchu pro vyvětrání	3000	[m <sup>3</sup> /h]
Výměna vzduchu při provozu	300	[m <sup>3</sup> /h]
Teplotní rozsah (se solární simulací)	-10 až +50	[°C]
Teplotní rozsah (bez solární simulace)	-40 až +85	[°C]
Rychlost teplotní změny (IEC 60068-35-5)	± 1	[°C]
Vlhkostní rozsah (se solární simulací)	30–60	[%RH]
Vlhkostní rozsah (bez solární simulace)	30–95	[%RH]
Stabilita udržování vlhkosti	± 5	[%RH]
Rosný bod	5–49	[°C]
Solární simulace	10 000	[W]
	1000	[W/m <sup>2</sup> ]

### 3.2.3 Multifunkční měřič Testo 435

Měřič byl použit pro měření rychlosti proudění vzduchu okolo rukavic, teploty a vlhkosti v klimatické komoře. Všechny naměřené hodnoty byly v průběhu měření porovnávány s hodnotami měřenými tepelným manekýnem Newtonem a samotnou klimatickou komorou.

Multifunkční měřicí přístroj Testo 435 je dodáván s širokou škálou sond umožňující analyzovat kvalitu okolního vzduchu, proto je možné ho použít jak v laboratoři, tak při instalacích a revizích vzduchotechniky. Pro posouzení kvality vzduchu jsou k dispozici parametry CO<sub>2</sub>, relativní vlhkost a teplota okolního vzduchu. Navíc je možné určit absolutní tlak, stupeň turbulence, rychlost proudění vzduchu intenzitu osvětlení a povrchovou teplotu. Pro určení objemového průtoku jsou k dispozici veškeré možnosti měření proudění: Termické a vrtulkové sondy či Pitotova trubice. Je možné uložit až 10 000 naměřených hodnot a poté je pomocí softwaru v PC dokumentovat a archivovat [28].

Tabulka 3.3: Technická data přístroje [28]

Veličina	Hodnota	Jednotka
Provozní teplota	-20 až +50	[°C]
Rozměry	220*74*46	[mm]
Životnost	200	[hod]
Hmotnost	0,428	[kg]
Materiál pláště	ABS/TPE/kov	[-]
Druh krytí	IP54	[-]



Obrázek 3.6: Multifunkční měřič Testo 435-2 [28]

Během měření byla s přístrojem použita „Termická sonda proudění s integrovaným měření teploty a vlhkosti“. Rychlost proudění je měřena za pomoci žhaveného drátku. Její průměr je 12 mm, s možností teleskopického měření až v maximální vzdálenosti 745 mm [29].

Tabulka 3.4: Technická data termické sondy [29]

Veličina	Měřicí rozsah	Přesnost	Jednotka
Teplota	-20 až +70	$\pm 0,3$	[°C]
Vlhkost	0–100	$\pm 2$	[%RH]
Rychlost proudění	0–20	$\pm 0,03$ + 4 % z naměr. hod.	[m/s]



Obrázek 3.7: Termická sonda proudění s měřením teploty a vlhkosti [29]

### 3.3 Příprava a průběh měření

Měřené vzorky byly vloženy do vystabilizované klimatizační komory 24 hodin před začátkem měření, jak požaduje norma. Po větší část doby kondicionování byla klimatizační komora ve vypnutém stavu, nicméně střední hodnota teploty se od požadované neodchýlila více než o  $\pm 2$  °C. Tento kompromis byl zvolen z důvodu nemožnosti provozovat komoru celých 24 hodin před měření jen z důvodu kondicionování vzorků, což by bylo energeticky i finančně velmi náročné.

#### Tepelný manekýn

2 až 3 hodiny před začátkem prvního měření byl tepelný manekýn Newton zapnut a zóny č. 7-12 (levá a pravá dlaň, levé a pravé předloktí) byly nastaveny na požadovanou teplotu 34 °C. Tento časový úsek byl zvolen na základě dřívějších zkušeností, aby došlo ke správnému prohřátí manekýna a nedocházelo ke vzniku parazitických, nežádoucích tepelných toků, které by mohly ovlivňovat přesnost měření [1].

Po tomto časovém intervalu byl na ruce manekýna nasazen měřený vzorek. Po ustálení teploty rukou a tepelného toku (20 až 30 minut) bylo provedeno desetiminutové měření středních hodnot. Poté byl daný vzorek rukavice sundán, nasazen další a po stabilizaci změřen. Již změřené vzorky byly ponechány v klimatické komoře.

Vzhledem k okolním podmínkám v komoře (24 °C, rychlost 4 m/s) a z toho plynoucích velkých tepelných ztrát, bylo potřeba obě předloktí zakrýt hliníkovou fólií, aby byl tepelný manekýn schopen udržet požadovanou povrchovou teplotu 34 °C. Bez tohoto opatření totiž nebylo možné zadní předloktí vyhřát na vyšší teplotu než 33 °C, ačkoliv byl do daných segmentů dodáván maximální vyhřívací výkon 600 W/m<sup>2</sup>. Instalace hliníkové fólie je zobrazena na níže uvedeném obrázku.



Obrázek 3.8: Předloktí bez a včetně hliníkové fólie, pro snížení nadměrných tepelných ztrát z předloktí manekýna

### Klimatická komora

Komora byla spuštěna vždy ve stejný okamžik jako manekýn a nastavena na požadované hodnoty. Teplota vzduchu byla nastavena na  $T_A = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a relativní vlhkost vzduchu byla upravována na hodnotu 50 %RH. Tyto hodnoty byly udržovány po celou dobu měření a jejich hodnoty jsou zaznamenány u jednotlivých vzorků a kombinací v kapitole 4.

Vzhledem k faktu, že vybavení klimatizační komory nebylo schopno zajistit proudění vzduchu kolem rukavic o rychlosti 4 m/s, byli do ní nainstalovány dva pomocné axiální ventilátory, které tyto podmínky zajistili. Po celou dobu bylo v klimatické komoře zhasnuto, aby nedocházelo k ovlivňování měření radiací z orientačních halogenových reflektorů.

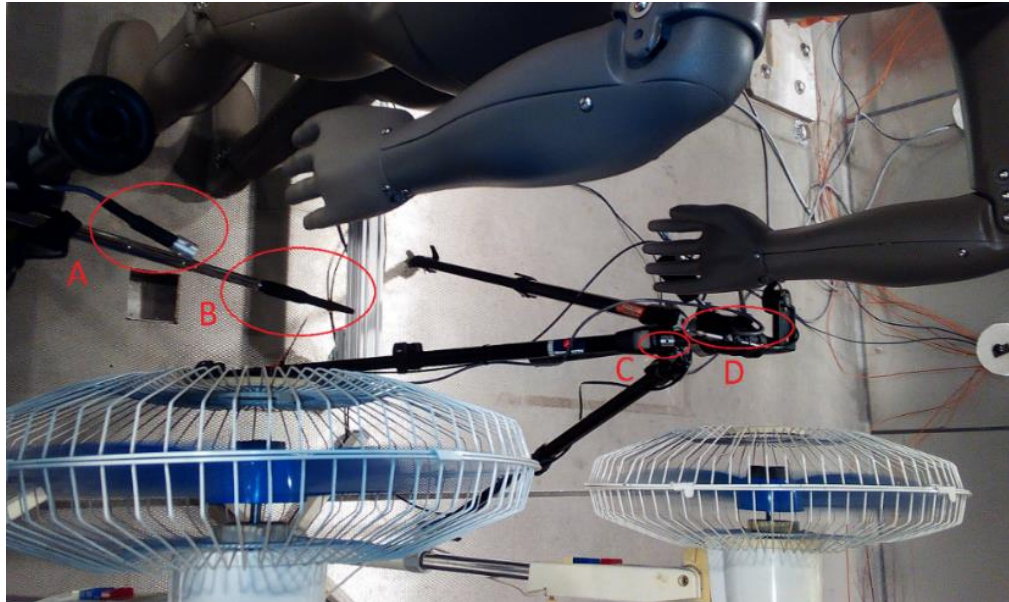
### Umístnění a nastavení měřícího zařízení

Tepelný manekýn byl umístěn ve středu klimatické komory s rukama ohnutými za zády a směřujícími kolmo k zemi, jak vyžaduje norma [23]. Při této poloze kolem nich může volně proudit vzduch, jak lze vidět na Obrázek 3.9.



Obrázek 3.9: Tepelný manekýn v klimatické komoře s rozmístěnými axiálními ventilátory

Za manekýnem byly umístěny axiální ventilátory zajišťující dostatečnou rychlost proudění vzduchu a také měřicí čidla. Konkrétně byla za levou rukou umístěna termická sonda proudění s měřením teploty a vlhkosti připojenou na multifunkční měřič Testo 435 (pozice B) a čidlo okolního vzduchu připojené k manekýnovi (pozice A). Za jeho pravou rukou byla na stojanu umístěna dvě čidla: čidlo teploty a vlhkosti vzduchu tepelného manekýna (pozice C) a také anemometr (pozice D). Jejich detailní rozmístění je vidět na Obrázek 3.10.



Obrázek 3.10: Detail rozmístění čidel

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT

V této kapitole jsou popsány a vyfoceny jednotlivé vzorky rukavic a jejich materiálové složení. Dále jsou zde uvedena naměřená data všech vzorků a postup jakým byla naměřená data zpracována.

### 4.1 Materiálové složení rukavic

Všechny vzorky byly dodané firmou Holík International s.r.o. Zdrojem materiálového složení jsou interní dokumenty této firmy, které nám byly poskytnuty [30].

#### 4.1.1 Rukavice pro srovnávací testy metodik

Tepelné odpory rukavic již byly testovány a vyhodnoceny v práci Pidrové [1]. V rámci této diplomové práce byly tři vybrané vzorky změřeny dle normy ČSN EN 511.

Tabulka 4.1: Složení vzorku č. 1 [1]

Hřbet rukavice		Dlaň rukavice	
Třívrstvý laminovaný materiál	Polyamid v kombinaci s vlnou	Kůže teletina s hydrofobní úpravou	
	Membrána	podšívka	thermocool™
	Mikrofleece		Merino Fresch Ag



Obrázek 4.1: Vzorek č. 1 hřbet a dlaň rukavice [1]



Tabulka 4.2: Složení vzorku č. 3 [1]

Hřbet rukavice	Dlaň rukavice
100% PES	Kůže kozina s hydrofobní úpravou
Zateplení 100% PES	Zateplení 100% PES
Membrána PU	Membrána PU
Podšívka Mikrofleece 100% PES	Podšívka Mikrofleece 100% PES



Obrázek 4.2: Vzorek č. 3 hřbet a dlaň rukavice [1]

Tabulka 4.3: Složení vzorku č. 4 [1]

Hřbet rukavice	Dlaň rukavice
100% PES	Kůže kozina s hydrofobní úpravou
Zateplení Primaloft	Zateplení Primaloft
Membrána PU	Membrána PU
Podšívka PES Thermolite	Podšívka PES Thermolite
X-Static	X-Static



Obrázek 4.3: Vzorek č. 4 hřbet a dlaň rukavice [1]

#### 4.1.2 Rukavice pro testování modularity

Firma Holík International s.r.o. nám dodala pro účely diplomové práce následujících šest vzorků rukavic. Cílem testování bylo ověřit modularitu rukavic, a proto jsou vzorky rozděleny do tří následujících kategorií:

1. Podvlekové tenké rukavice – vnitřní vrstva.
2. Střední rukavice – střední vrstva.
3. Převlekové rukavice – svrchní vrstva.

##### Podvlekové tenké rukavice

*Tenká jednovrstvá nehořlavá Nomexová rukavice s úpletovou manžetou okolo zápěstí – označení **Pod1**.*

Tabulka 4.4: Složení vzorku Pod1

Hřbet rukavice	Dlaň rukavice
Nomexová pletenina	Nomexová pletenina v kombinaci s jehnětinou



Obrázek 4.4: Vzorek Pod1 hřbet a dlaň rukavice



*Tenká polyesterová rukavice s úpletovou manžetou okolo zápěstí – označení Pod2.*

Tabulka 4.5: Složení vzorku Pod2

Hřbet rukavice	Dlaň rukavice
Polyesterová pletenina s počesem	Polyesterová pletenina s počesem, výztuhy z koziny, umělá vodivá kůže



Obrázek 4.5: Vzorek Pod2 hřbet a dlaň rukavice

**Střední rukavice**

*Mírně zateplená pětiprstá rukavice s podšívkou a pruženkou kolem zápěstí – označení Str.*

Tabulka 4.6: Složení vzorku Str

Hřbet rukavice	Dlaň rukavice	Kryty prstů
Softshell	Kozina	Kozina
Membrána	Membrána	
PES – Mikrofleece	PES – Mikrofleece	
Primaloft 60		



Obrázek 4.6: Vzorek Str hřbet a dlaň rukavice

## Převlekové rukavice

Převlekové rukavice mají největší zateplení a tvoří největší tepelnou ochranu. Všechny tři rukavice jsou ušity ze stejné kombinace materiálů, abychom je mohli dobře porovnat. Každá je vybavena utahovacím systémem v oblasti zápěstí a na okraji rukavice.

*Převleková rukavice pětiprstá – označení **Pre5**.*

Tabulka 4.7: Složení vzorku Pre5

Hřbet rukavice	Dlaň rukavice	Kryty prstů	Hřbetová výztuha
Cordura	Aramidová pletenina se silikonovým povrstvením	Aramidová pletenina se silikonovým povrstvením	Aramidová pletenina se silikonovým povrstvením
Primaloft 170	Primaloft 133		Molitan
PES laminovaný s molitanem	PES laminovaný s molitanem		



Obrázek 4.7: Vzorek Pre5 hřbet a dlaň rukavice

*Převleková rukavice tříprstá – označení **Pre3**.*

Tabulka 4.8: Složení vzorku Pre3

Hřbet rukavice	Dlaň rukavice	Kryty prstů	Hřbetová výztuha
Cordura	Aramidová pletenina se silikonovým povrstvením	Aramidová pletenina se silikonovým povrstvením	Aramidová pletenina se silikonovým povrstvením
Primaloft 170	Primaloft 133		Molitan
PES laminovaný s molitanem	PES laminovaný s molitanem		



Obrázek 4.8: Vzorek Pre3 hřbet a dlaň rukavice

*Převleková rukavice palčák (dvouprstá) – označení **Pre2**.*

Tabulka 4.9: Složení vzorku Pre2

Hřbet rukavice	Dlaň rukavice	Kryty prstů	Hřbetová výztuha
Cordura	Aramidová pletenina se silikonovým povrstvením	Aramidová pletenina se silikonovým povrstvením	Aramidová pletenina se silikonovým povrstvením
Primaloft 170 PES laminovaný s molitanem	Primaloft 133 PES laminovaný s molitanem		Molitan



Obrázek 4.9: Vzorek Pre2 hřbet a dlaň rukavice

## 4.2 Průběh experimentu

Měření rukavic Pidrové [1] proběhlo dne 3. 2. 2017, během kterého byly změřeny všechny tři vzorky dle metodiky dané normou ČSN EN 511 [23].

Experimentální měření samostatných vzorků ušitých pro účely této diplomové práce proběhlo dne 6. 2. 2017 a jejich modulární kombinace byly změřeny dne 10. 2. 2017. Poté proběhlo vyhodnocení dat a vzorky či kombinace, jejichž výsledné hodnoty nesplnily požadavky normy byly opětovně přeměřeny 13. 2. 2017.

Průběh samotného měření je popsán v kapitole 3.3.



Obrázek 4.10: Modulární kombinace Pre5 a Str připravena k měření

## 4.3 Zpracování dat

Data byla zpracována pomocí softwaru ThermDAC 8 dodaného s tepelným manekýnem Newtonem a programu Microsoftu Excel. Čidla tepelného manekýna i multifunkčního měřiče Testo 435 zaznamenávaly data v časovém intervalu 10 s, tj. s frekvencí  $f = 0,1 \text{ Hz}$ .

Data byla ukládána po celou dobu měření i během ustalování teploty a tepelného toku. Vyhodnocovány byly desetiminutové intervaly, během kterých již byly hodnoty těchto veličin stabilní, posléze byl základě těchto dat dle vztahu (1.18) vypočten celkový odpor rukavic  $R_C$  a také nejistoty měření.

Dalšími zaznamenanými daty byly hodnoty teploty okolí, vlhkosti vzduchu a rychlosti proudění vzduchu okolo rukavic. Teplota a vlhkost vzduchu byly

zaznamenávány jak termickou sondou měřiče Testo 435, tak externími senzory tepelného manekýna. Senzory tepelného manekýna zaznamenávaly hodnoty teploty vzduchu u levé i u pravé ruky manekýna.

Stabilita teploty vzduchu byla během měření průběžně vyhodnocována a měření referenčního desetiminutového intervalu započalo až poté, když rozdíl mezi jednotlivými čidly byl menší než 0,5 °C.

## 4.4 Naměřená data

V tabulkách jsou uvedeny naměřené hodnoty tepelných odporů rukavic (výsledná hodnota je dána aritmetickým průměrem), vlhkost a teplota v klimatické komoře měřena sondami tepelného manekýna. V tabulce jsou též uvedeny hodnoty vlhkosti a teploty v klimatické komoře a rychlost proudění vzduchu v okolí rukavic, která byly změřeny multifunkčním měřicím přístrojem Testo 435.

### Vzorky z práce Pidrové [1]

Tabulka 4.10: Naměřená data vzorku č. 1

Vzorek č. 1				
			1. měření	
			levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic		[m <sup>2</sup> K/W]	0,114	0,113
<b>Průměrný tepelný odpor rukavic</b>		<b>[m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>0,114</b>	
Manekýn	Teplota	[°C]	9,88	
	Vlhkost	[%]	48,30	
Testo 435	Teplota	[°C]	10,26	
	Vlhkost	[%]	47,82	
	R. proudění	[m/s]	4,20	

Tabulka 4.11: Naměřená data vzorku č. 3

Vzorek č. 3			
		1. měření	
		levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic	[m <sup>2</sup> K/W]	0,227	0,236
<b>Průměrný tepelný odpor rukavic</b>	<b>[m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>0,232</b>	
Manekýn	Teplota	[°C]	9,90
	Vlhkost	[%]	48,30
Testo 435	Teplota	[°C]	10,25
	Vlhkost	[%]	47,91
	R. proudění	[m/s]	4,18

Tabulka 4.12: Naměřená data vzorku č. 4

Vzorek č. 4			
		1. měření	
		levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic	[m <sup>2</sup> K/W]	0,314	0,313
<b>Průměrný tepelný odpor rukavic</b>	<b>[m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>0,314</b>	
Manekýn	Teplota	[°C]	9,80
	Vlhkost	[%]	48,40
Testo 435	Teplota	[°C]	10,23
	Vlhkost	[%]	47,91
	R. proudění	[m/s]	4,19

### Samostatně měřené rukavice

Tabulka 4.13: Naměřená data vzorku Pod1

Vzorek Pod1			
		1. měření	
		levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic	[m <sup>2</sup> K/W]	0,063	0,062
<b>Průměrný tepelný odpor rukavic</b>	<b>[m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>0,062</b>	
Manekýn	Teplota	[°C]	9,90
	Vlhkost	[%]	48,32
Testo 435	Teplota	[°C]	10,21
	Vlhkost	[%]	48,08
	R. proudění	[m/s]	4,37

Tabulka 4.14: Naměřená data vzorku Pod2

Vzorek Pod2				
			1. měření	
			levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic		[m <sup>2</sup> K/W]	0,066	0,065
<b>Průměrný tepelný odpor rukavic</b>		<b>[m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>0,066</b>	
Manekýn	Teplota	[°C]	9,91	
	Vlhkost	[%]	48,23	
Testo 435	Teplota	[°C]	10,39	
	Vlhkost	[%]	47,50	
	R. proudění	[m/s]	4,13	

Tabulka 4.15: Naměřená data vzorku Str

Vzorek Str						
			1. měření		2. měření	
			levá ruka	pravá ruka	levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic		[m²K/W]	0,173	0,187	0,179	0,181
Průměrný tep. odpor rukavic		[m²K/W]	0,180			
Manekýn	Teplota	[°C]	9,87		9,88	
	Vlhkost	[%]	48,10		48,33	
Testo 435	Teplota	[°C]	10,42		10,29	
	Vlhkost	[%]	47,35		47,77	
	R. proudění	[m/s]	4,11		4,16	

Tabulka 4.16: Naměřená data vzorku Pre5

Vzorek Pre5				
			1. měření	
			levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic		[m <sup>2</sup> K/W]	0,291	0,290
<b>Průměrný tepelný odpor rukavic</b>		<b>[m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>0,291</b>	
Manekýn	Teplota	[°C]	9,88	
	Vlhkost	[%]	48,02	
Testo 435	Teplota	[°C]	9,89	
	Vlhkost	[%]	48,89	
	R. proudění	[m/s]	3,81	

Tabulka 4.17: Naměřená data vzorku Pre3

Vzorek Pre3			
		1. měření	
		levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic	[m <sup>2</sup> K/W]	0,320	0,330
<b>Průměrný tepelný odpor rukavic</b>	<b>[m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>0,325</b>	
Manekýn	Teplota	[°C]	9,83
	Vlhkost	[%]	48,23
Testo 435	Teplota	[°C]	10,38
	Vlhkost	[%]	47,46
	R. proudění	[m/s]	4,11

Tabulka 4.18: Naměřená data vzorku Pre2

Vzorek Pre2			
		1. měření	
		levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic	[m <sup>2</sup> K/W]	0,383	0,370
<b>Průměrný tepelný odpor rukavic</b>	<b>[m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>0,325</b>	
Manekýn	Teplota	[°C]	9,83
	Vlhkost	[%]	48,23
Testo 435	Teplota	[°C]	10,38
	Vlhkost	[%]	47,46
	R. proudění	[m/s]	4,11

## Kombinace převlekových rukavic a středové rukavice

Tabulka 4.19: Naměřená data kombinace Pre5 + Str

Kombinace Pre5 + Str			
		1. měření	
		levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic	[m <sup>2</sup> K/W]	0,310	0,323
<b>Průměrný tepelný odpor rukavic</b>	<b>[m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>0,317</b>	
Manekýn	Teplota	[°C]	9,88
	Vlhkost	[%]	48,18
Testo 435	Teplota	[°C]	9,99
	Vlhkost	[%]	48,69
	R. proudění	[m/s]	4,35



Tabulka 4.20: Naměřená data kombinace Pre3 + Str

Kombinace Pre3 + Str			
		1. měření	
		levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic		[m <sup>2</sup> K/W]	0,369      0,358
<b>Průměrný tepelný odpor rukavic</b>		<b>[m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>0,364</b>
Manekýn	Teplota	[°C]	9,93
	Vlhkost	[%]	47,97
Testo 435	Teplota	[°C]	9,98
	Vlhkost	[%]	48,65
	R. proudění	[m/s]	4,30

Tabulka 4.21: Naměřená data kombinace Pre2 + Str

Kombinace Pre2 + Str			
		1. měření	
		levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic		[m <sup>2</sup> K/W]	0,394      0,400
<b>Průměrný tepelný odpor rukavic</b>		<b>[m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>0,397</b>
Manekýn	Teplota	[°C]	9,90
	Vlhkost	[%]	48,31
Testo 435	Teplota	[°C]	10,30
	Vlhkost	[%]	47,77
	R. proudění	[m/s]	4,11

### Kombinace převlekových a podvlekových rukavic

Tabulka 4.22: Naměřená data kombinace Pre5 + Pod1

Kombinace Pre5 + Pod1			
		1. měření	
		levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic		[m <sup>2</sup> K/W]	0,293      0,283
<b>Průměrný tepelný odpor rukavic</b>		<b>[m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>0,288</b>
Manekýn	Teplota	[°C]	9,93
	Vlhkost	[%]	48,22
Testo 435	Teplota	[°C]	10,11
	Vlhkost	[%]	48,43
	R. proudění	[m/s]	4,26

Tabulka 4.23: Naměřená data kombinace Pre3 + Pod1

Kombinace Pre3 + Pod1			
		1. měření	
		levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic	[m <sup>2</sup> K/W]	0,328	0,324
<b>Průměrný tepelný odpor rukavic</b>	<b>[m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>0,326</b>	
Manekýn	Teplota	[°C]	9,88
	Vlhkost	[%]	48,14
Testo 435	Teplota	[°C]	9,94
	Vlhkost	[%]	48,72
	R. proudění	[m/s]	4,02

Tabulka 4.24: Naměřená data kombinace Pre2 + Pod1

Kombinace Pre2 + Pod1			
		1. měření	
		levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic	[m <sup>2</sup> K/W]	0,377	0,375
<b>Průměrný tepelný odpor rukavic</b>	<b>[m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>0,376</b>	
Manekýn	Teplota	[°C]	9,93
	Vlhkost	[%]	47,92
Testo 435	Teplota	[°C]	10,00
	Vlhkost	[%]	48,64
	R. proudění	[m/s]	4,04

Tabulka 4.25: Naměřená data kombinace Pre2 + Pod2

Kombinace Pre2 + Pod2			
		1. měření	
		levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic	[m <sup>2</sup> K/W]	0,367	0,374
<b>Průměrný tepelný odpor rukavic</b>	<b>[m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>0,370</b>	
Manekýn	Teplota	[°C]	9,85
	Vlhkost	[%]	48,22
Testo 435	Teplota	[°C]	9,96
	Vlhkost	[%]	48,81
	R. proudění	[m/s]	4,08

## Kombinace středové a podvlekových rukavic

Tabulka 4.26: Naměřená data kombinace Str + Pod1

Kombinace Str + Pod1						
		[m²K/W]	1. měření		2. měření	
			levá ruka	pravá ruka	levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic		[m²K/W]	0,184	0,198	0,187	0,200
Průměrný tep. odpor rukavic		[m²K/W]	0,192			
Manekýn	Teplota	[°C]	9,88		9,94	
	Vlhkost	[%]	48,41		47,34	
Testo 435	Teplota	[°C]	10,32		10,12	
	Vlhkost	[%]	47,65		47,41	
	R. proudění	[m/s]	4,28		4,24	

Tabulka 4.27: Naměřená data kombinace Str + Pod2

Kombinace Str + Pod2						
			1. měření		2. měření	
			levá ruka	pravá ruka	levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic		[m²K/W]	0,179	0,193	0,183	0,193
Průměrný tep. odpor rukavic		[m²K/W]	0,187			
Manekýn	Teplota	[°C]	9,85		9,84	
	Vlhkost	[%]	48,30		48,22	
Testo 435	Teplota	[°C]	9,95		10,01	
	Vlhkost	[%]	48,68		48,65	
	R. proudění	[m/s]	3,97		4,34	

### Trojkombo (kombinace palčáku Pre2, střední rukavice a podvlekových rukavic)

Vzhledem ke konstrukci ruky tepelného manekýna Newtona jsme bohužel nemohli naměřit také kombinace s pěti- a tříprstou převlekovou rukavicí. Jeho ruka má příliš malé mezery mezi jednotlivými prsty a tyto kombinace nebylo možné do daného prostoru vměstnat.

Tabulka 4.28: Naměřená data kombinace Pre 2 + Str + Pod1

Kombinace Pre2 + Str + Pod1				
			1. měření	
			levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic		[m <sup>2</sup> K/W]	0,397	0,408
<b>Průměrný tepelný odpor rukavic</b>		<b>[m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>0,403</b>	
Manekýn	<b>Teplota</b>	[°C]	9,90	
	<b>Vlhkost</b>	[%]	48,10	
Testo 435	<b>Teplota</b>	[°C]	10,03	
	<b>Vlhkost</b>	[%]	48,61	
	<b>R. proudění</b>	[m/s]	4,30	

Tabulka 4.29: Naměřená data kombinace Pre 2 + Str + Pod2

Kombinace Pre2 + Str + Pod2						
			1. měření		2. měření	
			levá ruka	pravá ruka	levá ruka	pravá ruka
Tepelný odpor rukavic		[m²K/W]	0,380	0,402	0,399	0,408
Průměrný tep. odpor rukavic		[m²K/W]	0,397			
Manekýn	Teplota	[°C]	9,89		9,88	
	Vlhkost	[%]	48,22		48,22	
Testo 435	Teplota	[°C]	9,89		10,04	
	Vlhkost	[%]	48,72		48,56	
	R. proudění	[m/s]	4,35		4,18	

#### 4.4.1 Vyhodnocení opakovatelnosti

Opakovatelnost měření již byla prověřena a potvrzena v práci Pidrové [1]. V této práci jsme se řídili pokyny normy ČSN EN ISO 15831 [24] a pokud byly splněny, opakované měření nebylo třeba. Jak norma vyžaduje, u každého vzorku proběhly minimálně dvě měření (levá a pravá rukavice). V případě, že byl rozdíl mezi jednotlivými měřeními vyšší než 4 %, provedli jsme opakované měření pro ověření správnosti výsledků.

## 4.5 Nejistoty měření

Provedená měření jsou neúplná bez uvedené nejistoty měření. Všechna měření jsou zatížena určitou chybou, kterou nejistota měření číselně vyjadřuje a určuje interval hodnot ve kterém námi změřená hodnota s jistou procentuální jistotou leží.

Vyjádření výsledné číselné hodnoty měření, včetně nejistoty měření, umožňuje srovnat výsledky s dalšími provedenými měřeními, např. se zkušebnou s certifikací, jinou laboratoří či firmou.

Výsledná nejistota se skládá z několika dílčích nejistot. Obecně se jedná o tyto dva typy nejistot [31]:

- **Typ A ( $\mu_A$ )** – nejistota statistického zpracování opakovaně naměřených údajů za stejných podmínek měření (tlak, teplota, vlhkost).
- **Typ B ( $\mu_B$ )** – nejistota způsobená známými nebo odhadnutelnými příčinami, tj. nedokonalostí měřicích přístrojů, chybnou instalací přístrojů, vlivem operátora, vlivem použitých metod měření.

Z těchto dvou nejistot je dále možné určit kombinovanou **nejistotu typu C ( $\mu_C$ )** dle vztahu:

$$\mu_C = \sqrt{\mu_A^2 + \mu_B^2} \quad (4.1)$$

Z této nejistoty můžeme určit také rozšířenou nejistotu. Standardně nejistota typu C značí interval, ve kterém výsledná hodnota měření leží s 68% jistotou. Tento interval je možné rozšířit na intervaly s vyšší procentuální jistotou, tj. 95% ( $2\sigma$  interval) či 99% ( $3\sigma$  interval). Rozšířenou nejistotu typu C vyjádříme vzorcem [32]:

$$U = k \cdot \mu_C = k \cdot \sqrt{\mu_A^2 + \mu_B^2} \quad (4.2)$$

V této práci je proveden výpočet nejistot s 95% jistotou, koeficient  $k$  je roven 2 a platí:

$$U = 2 \cdot \sqrt{\mu_A^2 + \mu_B^2} \quad (4.3)$$

### 4.5.1 Nejistota typu A

Pro její výpočet slouží následující vzorec [32]:

$$\mu_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.4)$$

kde:  $\mu_A$  je směrodatná odchylka aritmetického průměru.  
 $s$  je výběrová směrodatná odchylka z naměřených hodnot.  
 $n$  je počet měření.

V případě, že proběhlo méně než deset měření (pro tuto práci byly většina vzorků změřena dvakrát či čtyřikrát) je potřeba vypočtenou nejistotu rozšířit pomocí bezpečnostního faktoru  $k_{UA}$ .

platí [32]:

$$\mu_A = k_{UA} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} = k_{UA} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (4.5)$$

kde:  $x_i$  je jednotlivá naměřená hodnota.

$\bar{x}$  je střední hodnota z provedených měření.

$n$  je opět počet proběhlých měření.

Tabulka 4.30: Hodnoty bez. faktoru  $k_{UA}$  pro počet měření menší než 10 [32]

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10 a více
$k_{UA}$	7	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1

Počet opakování měření je u některých vzorků pouze dvojnásobný, což by u výpočtu nejistoty typu A vedlo k užití bezpečnostního faktoru  $k_{UA} = 7$ . Tato práce ovšem navazuje na práce Pidrové [1] a Fojtlína [33], na základě jejich výsledků uvažujeme normální rozdělení pravděpodobnosti dat, a proto je uvažován bezpečnostní faktor  $k_{UA} = 2$ .

## 4.5.2 Nejistota typu B

Tuto nejistotu dělíme do 3 podskupin:

- Variabilní systematické chyby.
- Náhodné zdroje se známou variabilitou.
- Ostatní zdroje nejistoty.

U nepřímě měřené veličiny lze systematické chyby spočítat pomocí následujícího vzorce [1]:

$$\mu_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\mu_{Bi})^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f(x_1 \dots x_n)}{\partial x_i} \cdot \mu_{x_i} \right)^2} \quad (4.6)$$

kde:  $\mu_{x_i}$  jsou jednotlivé nejistoty měřených veličin.

$\frac{\partial f(x_1 \dots x_n)}{\partial x_i}$  jsou parciální derivace funkce veličin  $x_1 \dots x_n$  (pomocí kterých byla spočtena výsledná hodnota chtěné veličiny) funkcí i-té veličiny  $x_i$ .

$n$  je počet veličin vyskytujících se ve funkci  $f$ .

Do vztahu (4.6) za funkci  $f$  dosadíme celkový tepelný odpor  $R_c$  vyjádřený ve vztahu (1.18), který je funkcí tří veličin. Tento vztah musíme derivovat dle všech třech změřených veličin ovlivňující nejistotu měření.

Platí:

$$\mu_B = \sqrt{\left(\frac{\partial R_C}{\partial t_k} \cdot \mu_{t_k}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_C}{\partial t_t} \cdot \mu_{t_t}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_C}{\partial \dot{q}} \cdot \mu_{\dot{q}}\right)^2} [m^2 \cdot K/W] \quad (4.7)$$

Do této rovnice dosadíme za  $R_C$  a parciálně ji derivujeme. Výsledkem je vztah pro výpočet nejistot:

$$\mu_B = \sqrt{\left(\frac{1}{\dot{q}} \cdot \mu_{t_k}\right)^2 + \left(\frac{1}{\dot{q}} \cdot \mu_{t_t}\right)^2 + \left(\frac{t_k - t_t}{\dot{q}^2} \cdot \mu_{\dot{q}}\right)^2} [m^2 \cdot K/W] \quad (4.8)$$

Do výsledného vztahu musíme dosadit hodnoty  $t_k$ ,  $t_t$  a  $\dot{q}$ . Hodnoty těchto veličin jsou vypočteny jako průměrné hodnoty z vybraných desetiminutových intervalů, stejných jako u výpočtu tepelného odporu rukavic.

Hodnoty nejistot měřených veličin jsou převzaty z [33]. U výpočtu teplot jsou hodnoty nejistot měření  $u_{t_k} = u_{t_t} = \pm 0,05 \text{ } ^\circ\text{C}$  a u výpočtu tepelného toku  $u_{\dot{q}} = 0,5 \%$  z jeho naměřené hodnoty. Obě tyto nejistoty měření platí pro 68% interval.

#### 4.5.2.1 Ukázka výpočtu kombinované nejistoty typu C:

Pro tento příklad byla vybrána kombinace střední (Str) a tenké jednovrstvé Nomexové rukavice s úpletovou manžetou okolo zápěstí (Pod1). Hodnoty uvedené v Tabulka 4.31 byly určeny ze stejných desetiminutových intervalů jako při výpočtu tepelného odporu rukavic.

Tabulka 4.31: Hodnoty veličin použitých při výpočtu nejistoty u kom. Str + Pod1

Kombinace (Str + Pod1)					
		1. měření		2. měření	
		levá ruka	pravá ruka	levá ruka	pravá ruka
Tepelný tok $q$	[W/m <sup>2</sup> ]	130,795	122,113	128,413	120,125
Průměr tepelného toku $q$	[W/m <sup>2</sup> ]	125,361			
Rozdíl teplot $t_k - t_t$	[°C]	24,117	24,120	24,060	24,059
Průměr rozdílu teplot $t_k - t_t$	[°C]	24,089			

#### Výpočet nejistoty typu A

Pro její výpočet je třeba znát bezpečnostní faktor pro daný počet měření  $k_{UA} = 1,7$ , počet opakování měření  $n = 4$  a směrodatnou odchylku  $s = 0,007702$ . V našem případě byla směrodatná výběrová odchylka vypočtena funkcí SMODCH.VÝBĚR.S v programu Excel od společnosti Microsoft.

$$\mu_A = 1,7 \cdot \frac{0,007702}{\sqrt{4}} = 0,0065 \text{ } m^2 \cdot K/W \quad (4.9)$$

### Výpočet nejistoty typu B

Hodnoty z Tabulka 4.31 dosadíme do vzorce (4.8). Nejistoty teploty jsou  $u_{t_k} = u_{t_t} = \pm 0,05 \text{ } ^\circ\text{C}$  a nejistotu tepelného toku získáme vynásobením jeho naměřené hodnoty a procentuální nejistoty  $u_{\dot{q}} = 0,5 \text{ } \%$ .

$$u_B = \sqrt{\left(\frac{1}{125,36} \cdot 0,05\right)^2 + \left(\frac{1}{125,36} \cdot 0,05\right)^2 + \left(\frac{24,089}{125,36^2} \cdot 0,005 \cdot 125,36\right)^2} \quad (4.10)$$

Výsledná hodnota  $u_B$  :

$$\mu_B = 0,0011 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (4.11)$$

### Výpočet nejistoty typu C

Výslednou kombinovanou nejistotu vypočteme dle vzorce (4.1):

$$\mu_C = \sqrt{0,0065^2 + 0,0011^2} = 0,0066 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (4.12)$$

A poté ji rozšíříme na  $2\sigma$  interval:

$$U = k \cdot \mu_C = 2 \cdot 0,0066 = 0,0133 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (4.13)$$

Výslednou hodnotu tepelného odporu pro kombinaci rukavic Str + Pod1 můžeme zapsat ve tvaru:

$$R_c = 0,1924 \pm 0,0133 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (4.14)$$



## 5 SHRUTÍ VÝSLEDKŮ A JEJICH VYHODNOCENÍ

V této kapitole jsou souhrnně uvedeny všechny naměřené hodnoty tepelných odporů rukavic a jejich srovnání. V každé kategorii je porovnána hodnota tepelného odporu levé a pravé rukavice a je uvedeno, zda bylo splněno pravidlo dle normy [24].

### 5.1 Srovnání metodiky Pidrové a metodiky dle normy ČSN EN 511

V metodice navržené v práci Pidrové [1] nebylo z finančních důvodů realizováno proudění vzduchu o rychlosti 4 m/s a také minimální požadovaný rozdíl teploty povrchu tepelného manekýna a vzduchu v klimatické komoře 20 °C nebyl dodržen. Teplota manekýna byla udržována na 34 °C a teplota okolního vzduchu byla udržována v intervalu 20 °C ± 1 °C. Vlhkost vzduchu v klimatické komoře také nebyla upravena.

Tepelný odpor rukavic byl dle navržené metodiky vypočten dle následujícího vzorce [1]:

$$R_R = \frac{T_{op} - T_{o\infty}}{\dot{q}_o} - \frac{T_{np} - T_{n\infty}}{\dot{q}_n} [m^2K/W] \quad (5.1)$$

kde:  $T_{op}$  je teplota povrchu ruky v rukavici [°C].  
 $T_{o\infty}$  je teplota okolního vzduchu při měření s rukavicí [°C].  
 $T_{np}$  je teplota povrchu neoblečené ruky [°C].  
 $T_{n\infty}$  je teplota okolního vzduchu při měření neoblečené ruky [°C].  
 $\dot{q}_o$  je celkový tepelný tok [ $W \cdot m^{-2}$ ].  
 $\dot{q}_n$  je konvektivní tepelný tok mezní vrstvou [ $W \cdot m^{-2}$ ].

Rovnici (5.1) můžeme zapsat i ve tvaru:

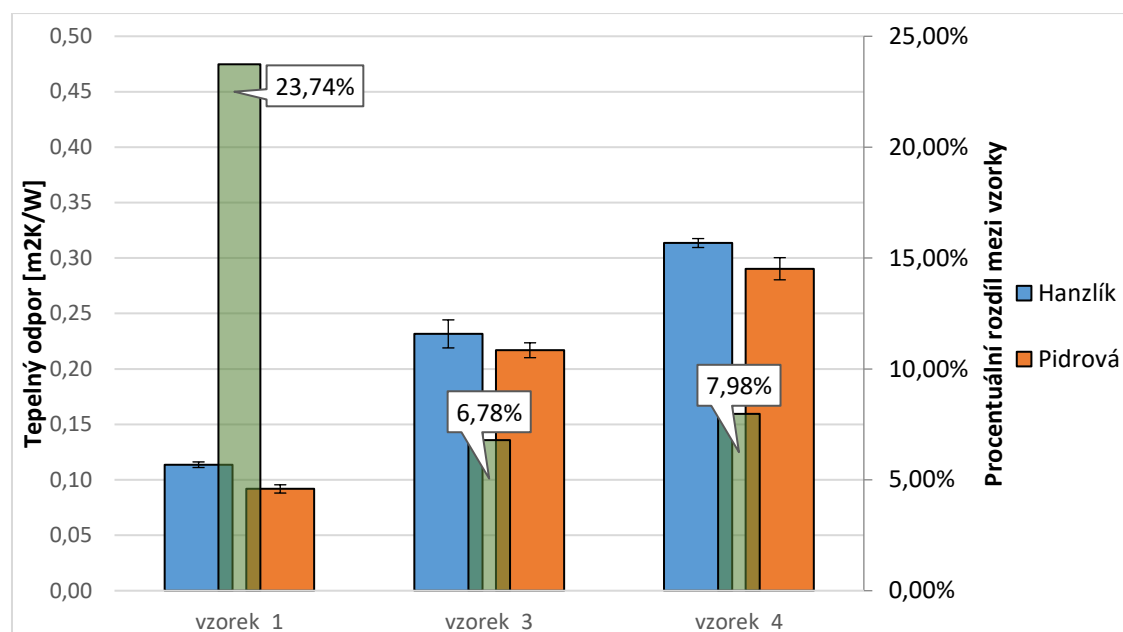
$$R_R = R_C - R_\alpha [m^2K/W] \quad (5.2)$$

kde:  $R_C$  je celkový tepelný odpor [ $m^2K/W$ ].  
 $R_\alpha$  je konvektivní tepelný odpor [ $m^2K/W$ ].

Hodnotu tepelného odporu dle normy ČSN EN 511 jsme ověřili u třech vzorků, a to konkrétně u vzorků č.1, č.3 a č.4, jejichž materiálové složení je popsáno v kapitole 4.1.

Tabulka 5.1: Srovnání tepelných odporů vypočtených dle různých metodik

Vzorky	Hanzlík	Nejistota C	Pidrová	Nejistota C	Jednotka	Proc. Srovnání
Vzorek č.1	0,114	± 0,003	0,092	± 0,004	[m <sup>2</sup> K/W]	23,74 %
Vzorek č.3	0,232	± 0,013	0,217	± 0,007	[m <sup>2</sup> K/W]	6,78 %
vzorek č.4	0,314	± 0,004	0,290	± 0,010	[m <sup>2</sup> K/W]	7,98 %



Obrázek 5.1: Srovnání tepelných odporů stanovených dle různých metodik

Z výše uvedených dat lze usuzovat, že metoda popsaná v diplomové práci [1] podhodnocuje tepelný odpor rukavic. Dle normy ČSN EN 511 je vzorek testován při proudění vzduchu o rychlosti  $4 \text{ m/s} \pm 0,5 \text{ m/s}$ . Při této rychlosti je teplo z povrchu rukavic rychle odváděno, ale stále zde existuje tenká mezní vrstva, kde dochází ke konvektivní přestupu tepla. V metodice navržené Pidrovou byl konvektivní přestup tepla zcela odečten a vzhledem k tomu, že měření byla realizována v prostředí s přirozenou konvekcí, byl tepelný odpor mezní vrstvy podstatně vyšší. Tento fakt je hlavním důvodem pro pozorované rozdíly daných metodik.

U vzorku 1 je rozdíl největší, protože se jednalo o nejtenčí vzorek, u kterého byl podíl konvektivní přestupu mezní vrstvou k celkovému odporu rukavice nejvyšší.

## 5.2 Měření dle normy ČSN EN 511 a ČSN EN ISO 15831

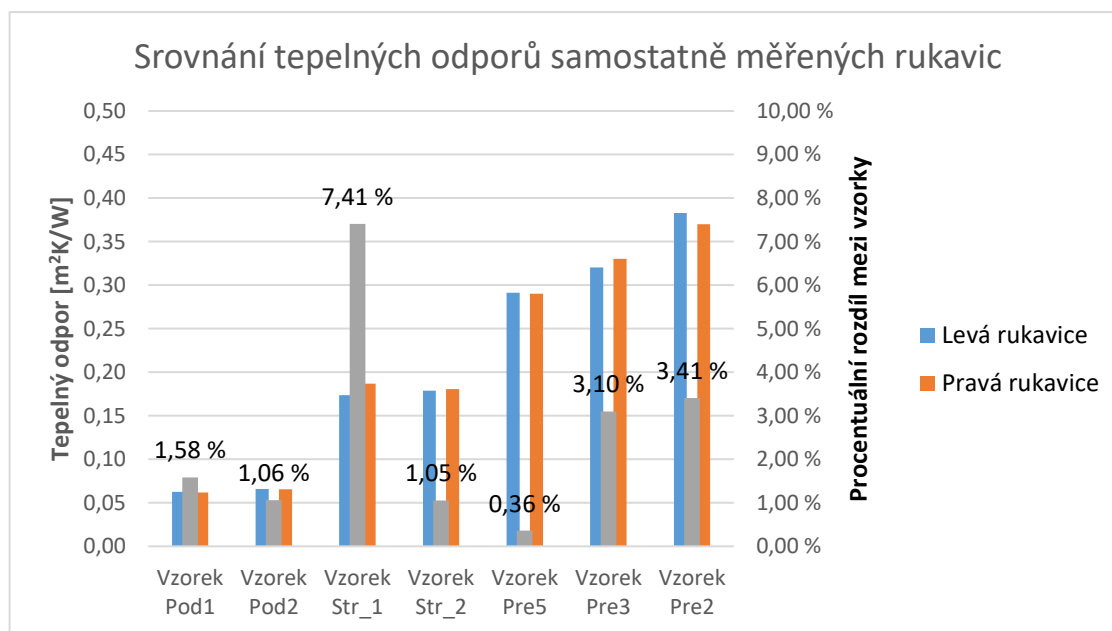
V požadavcích normy ČSN EN ISO 15831 [24] je uvedeno, že u každého testovaného vzorku musí proběhnout alespoň dvě samostatné zkoušky (levá a pravá rukavice). V případě, že rozdíl mezi měřeními je vyšší než 4 %, je nutné provést další měření.

Při měření jsme se řídili tímto požadavkem, u většiny vzorků a kombinací byla tato podmínka splněna. V případě, že se hodnoty tepelného odporu prvních dvou měření lišily o více než 4 %, bylo měření zopakováno s oběma rukavicemi daného vzorku.

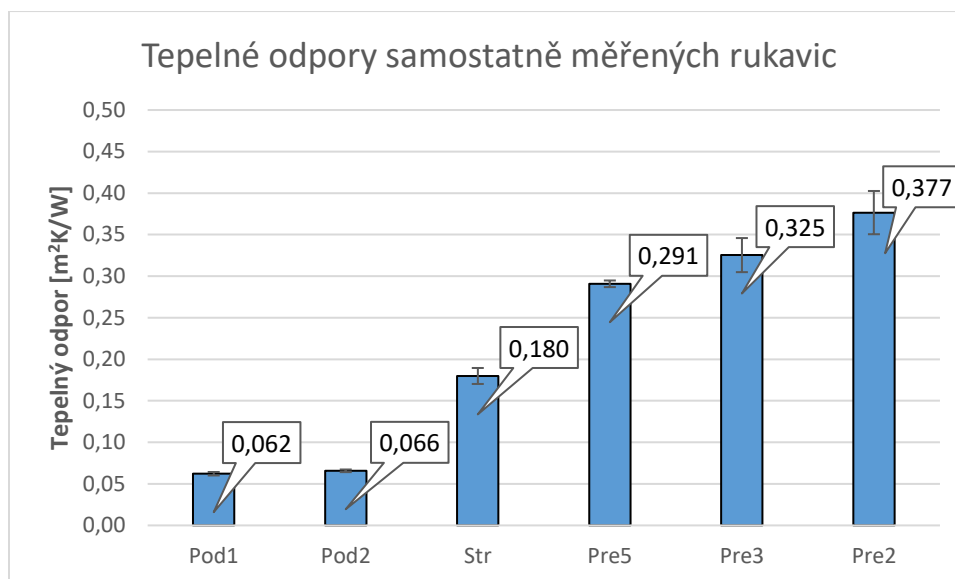
### 5.2.1 Samostatně měřené rukavice

Tabulka 5.2: Srovnání tepelných odporů samostatně měřených rukavic

Tepelný odpor vzorku		Naměřené hodnoty		Vypočtené hodnoty			Nejistota typu C
		levá ruka	pravá ruka	průměr	rozdíl	v procentech	
<b>Pod1</b>	[m <sup>2</sup> K/W]	0,063	0,062	0,062	0,001	1,58 %	± 0,007
<b>Pod2</b>	[m <sup>2</sup> K/W]	0,066	0,065	0,066	0,001	1,06 %	± 0,005
Str 1. měření	[m <sup>2</sup> K/W]	0,173	0,187	0,180	0,013	7,41 %	-
Str 2. měření	[m <sup>2</sup> K/W]	0,179	0,181	0,180	0,002	1,05 %	-
<b>Průměr Str</b>	[m <sup>2</sup> K/W]	-	-	0,180	-	-	± 0,010
<b>Pre5</b>	[m <sup>2</sup> K/W]	0,291	0,290	0,291	0,001	0,36 %	± 0,008
<b>Pre3</b>	[m <sup>2</sup> K/W]	0,320	0,330	0,325	0,010	3,10 %	± 0,071
<b>Pre2</b>	[m <sup>2</sup> K/W]	0,383	0,370	0,377	0,013	3,41 %	± 0,090



Obrázek 5.2: Srovnání tepelných odporů samostatně měřených rukavic



Obrázek 5.3: Tepelné odpory včetně kombinované nejistoty

Z hodnot vynesných ve výše uvedených grafech vyplývá, že s přibývajícimi vrstvami materiálu a jeho tloušťkou se tepelný odpor rukavic zvyšuje. Nejtenčí jednovrstvé rukavice Pod1 a Pod2 izolují přibližně třikrát méně než rukavice střední. Nejlépe zaizolované jsou rukavice převlekové, jejichž tepelný odpor má hodnotu v závislosti na typu konstrukce v intervalu od  $R_{Pre5} = 0,291 m^2K/W$  do  $R_{Pre2} = 0,377 m^2K/W$ . Hodnota tepelného odporu u podvlekových rukavic je na úrovni samotného konvektivního odporu mezní vrstvy.

Tento fakt je způsoben dvěma faktory. Nejenže samotná konstrukce je mohutnější, ale také velikost převlekových rukavic je jiná než u podvlekových a středního páru. Abychom tyto rukavice mohli použít pro modulární testování, byla jejich velikost č. 11, zatímco ostatní rukavice mají velikost č. 9. Tepelný odpor převlekových rukavic je tedy navýšen díky izolačním vlastnostem vzduchu a tloušťce jeho vrstvy.

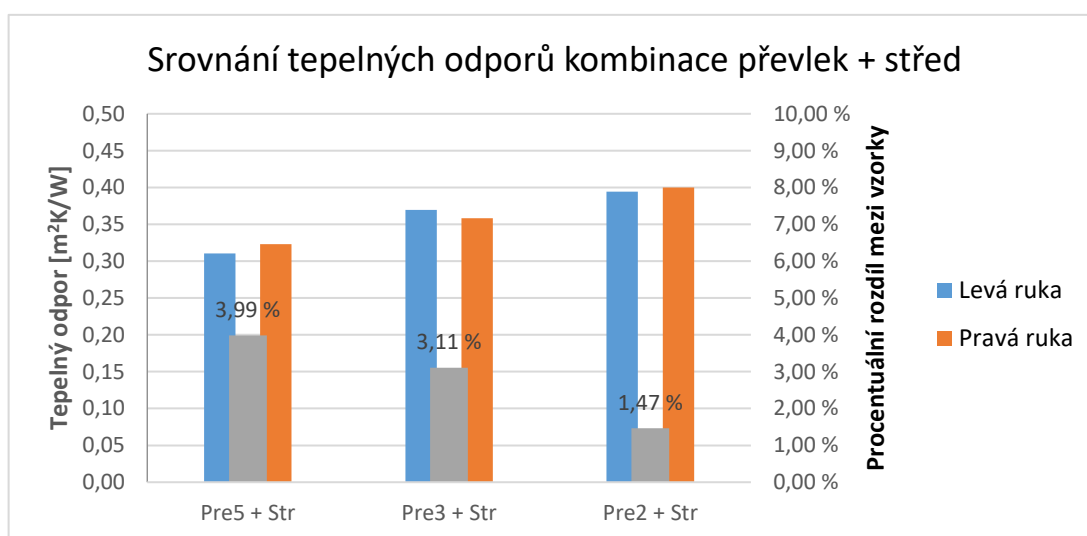
Srovnáním převlekových rukavic můžeme odvodit závislost obtékané plochy rukavic a jejich tepelného odporu. U modelu Pre5 s pěti samostatnými prsty je obtékaná plocha rukavic největší a tepelný odpor nejmenší, protože zde dochází k největšímu prostupu tepla ven z rukavice. Také fixované množství vzduchu v rukavici je nižší než u tříprsté či palčákové varianty. Naopak u vzorku Pre2 (palčák) je plocha rukavice nejmenší a tím pádem i tepelný odpor největší.

## 5.2.2 Kombinace převlekových rukavic a středové rukavice

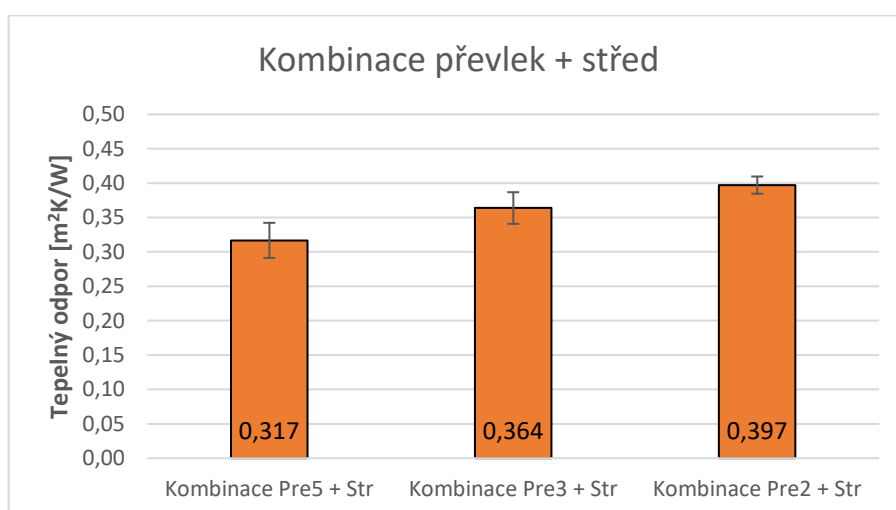
U této kombinace byly splněny požadavky normy, a proto byla provedena pouze dvě měření každé kombinace. Vložením středové rukavice do kombinace došlo k navýšení celkového tepelného odporu, ale stále je zde viditelný trend závislosti obtékané plochy převlekové rukavice a celkového tepelného odporu.

Tabulka 5.3: Srovnání tep. odporů převlekových rukavic a středové rukavice

Tepelný odpor kombinace		Naměřené hodnoty		Vypočtené hodnoty			Nejistota typu C
		levá ruka	pravá ruka	průměr	rozdíl	v procentech	
<b>Pre5 + Str</b>	[m <sup>2</sup> K/W]	0,310	0,323	0,317	0,013	3,99 %	± 0,026
<b>Pre3 + Str</b>	[m <sup>2</sup> K/W]	0,369	0,358	0,364	0,011	3,11 %	± 0,023
<b>Pre2 + Str</b>	[m <sup>2</sup> K/W]	0,394	0,400	0,397	0,006	1,47 %	± 0,013



Obrázek 5.4: Srovnání tepelných odporů kombinace převlek + střed



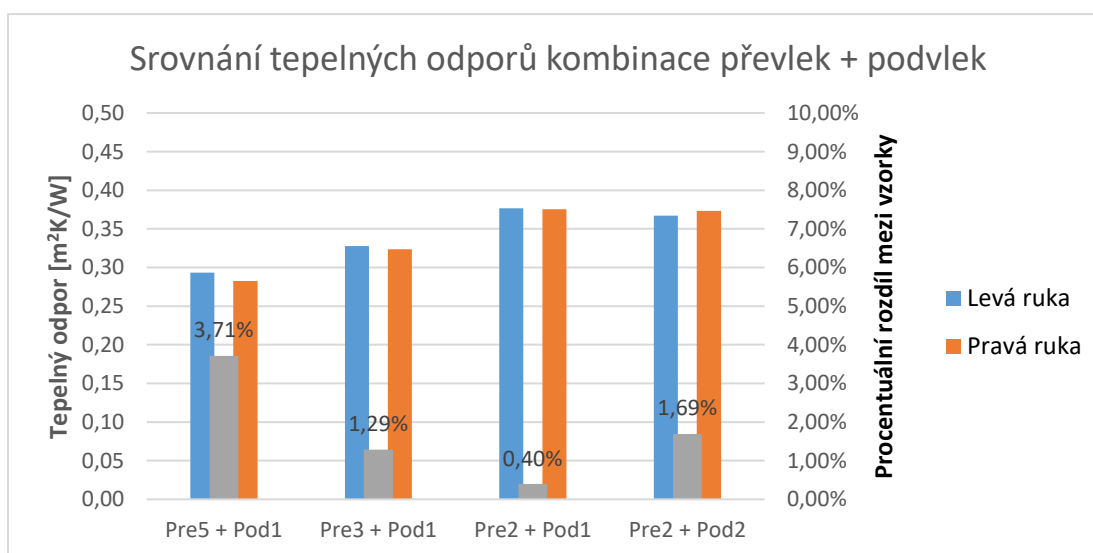
Obrázek 5.5: Tepelné odpory včetně kombinované nejistoty

### 5.2.3 Kombinace převlekových a podvlekových rukavic

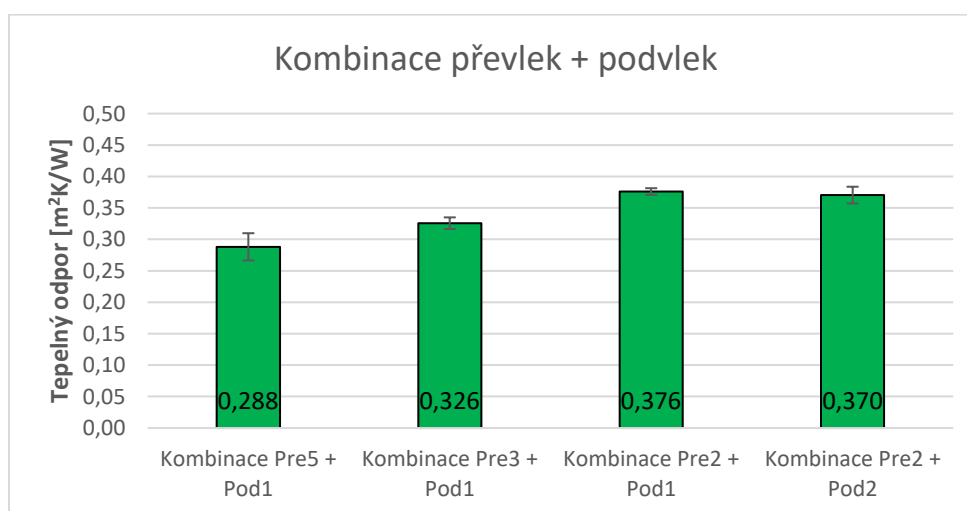
U této kombinace byly splněny požadavky normy, a proto byla provedena pouze dvě měření každé kombinace.

Tabulka 5.4: Srovnání tepelných odporů převlekových a podvlekových rukavic

Tepelný odpor kombinace		Naměřené hodnoty		Vypočtené hodnoty			Nejistota typu C
		levá ruka	pravá ruka	průměr	rozdíl	v procentech	
Pre5 + Pod1	[m <sup>2</sup> K/W]	0,293	0,283	0,288	0,011	3,71 %	± 0,022
Pre3 + Pod1	[m <sup>2</sup> K/W]	0,328	0,324	0,326	0,004	1,29 %	± 0,009
Pre2 + Pod1	[m <sup>2</sup> K/W]	0,377	0,375	0,376	0,001	0,40 %	± 0,005
Pre2 + Pod2	[m <sup>2</sup> K/W]	0,367	0,374	0,370	0,006	1,69 %	± 0,013



Obrázek 5.6: Srovnání tepelných odporů kombinace převlek + podvlek



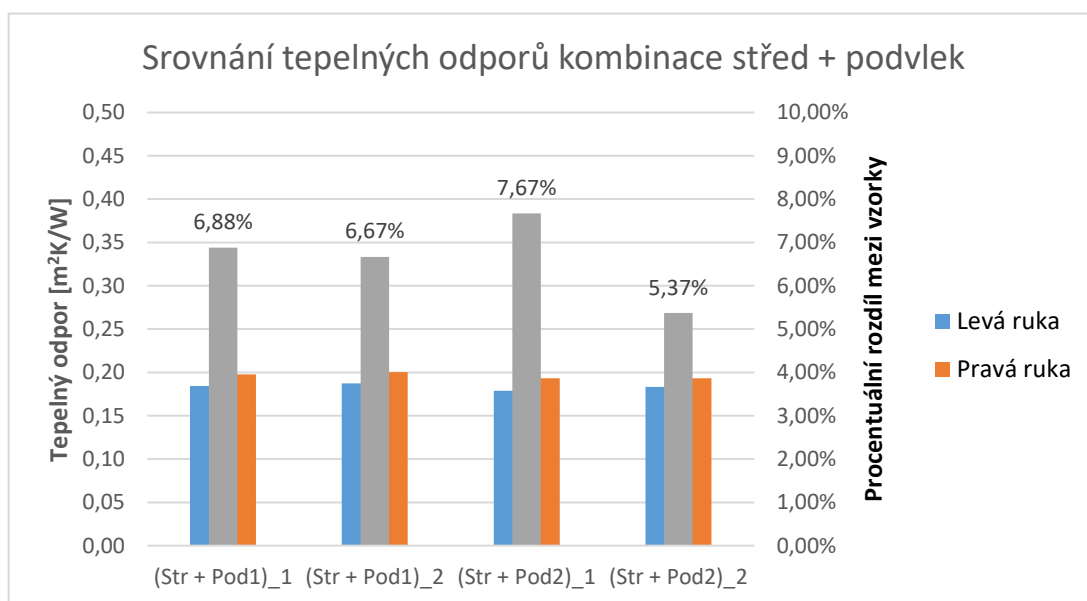
Obrázek 5.7: Tepelné odpory včetně kombinované nejistoty

## 5.2.4 Kombinace středové a podvlekových rukavic

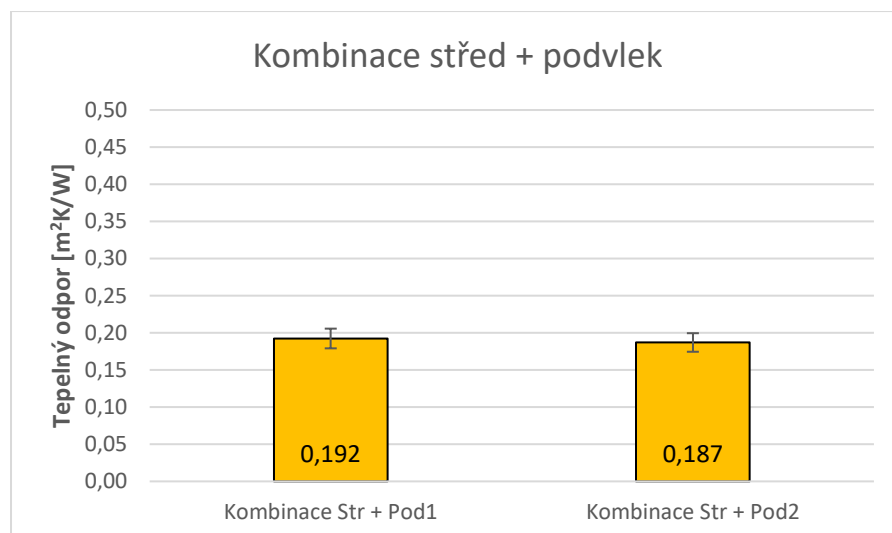
U této kombinace obě dvojice měření vyšly s vyšší než požadovanou odchylkou 4 %. Nicméně kombinovaná nejistota je relativně nízká a má hodnotu 6,9 % respektive 6,68 %. U těchto kombinací by bylo vhodné provést další měření a zpřesnit výslednou hodnotu.

Tabulka 5.5: Srovnání tepelných odporů středové a podvlekových rukavic

Tepelný odpor kombinace		Naměřené hodnoty		Vypočtené hodnoty			Nejistota typu C
		levá ruka	pravá ruka	průměr	rozdíl	v proc.	
Str + Pod1 - 1. měř	[m <sup>2</sup> K/W]	0,184	0,198	0,191	0,013	6,88 %	-
Str + Pod1 - 2. měř	[m <sup>2</sup> K/W]	0,187	0,200	0,194	0,013	6,67 %	-
<b>Průměr Str + Pod1</b>	[m <sup>2</sup> K/W]	-	-	0,192	-	-	± 0,013
Str + Pod2 - 1. měř	[m <sup>2</sup> K/W]	0,179	0,193	0,186	0,014	7,67 %	-
Str + Pod2 - 2. měř	[m <sup>2</sup> K/W]	0,183	0,193	0,188	0,010	5,37 %	-
<b>Průměr Str + Pod2</b>	[m <sup>2</sup> K/W]	-	-	0,187	-	-	± 0,013



Obrázek 5.8: Srovnání tepelných odporů kombinace střed + podvlek



Obrázek 5.9: Tepelné odpory včetně kombinované nejistoty

### 5.2.5 Trojkombinace (kombinace palčáku Pre2, střední rukavice a podvlekových rukavic)

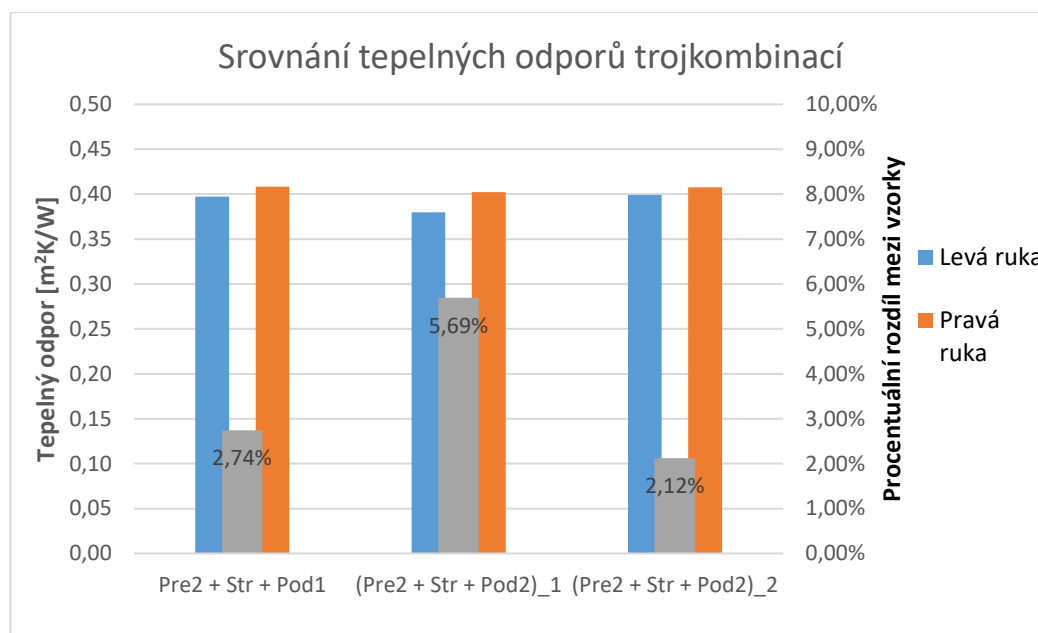
Vzhledem ke konstrukci ruky tepelného manekýna Newtona jsme bohužel nemohli naměřit také kombinace s pěti- a tříprstou převlekovou rukavicí. Jeho ruka má příliš malé mezery mezi jednotlivými prsty a tyto kombinace nebylo možné do daného prostoru vměstnat. Proto byly proměřeny pouze dvě trojkombinace lišící se použitou podvlekovou rukavicí.

V případě kombinace Pre2 + Str + Po2 nebyla při prvním měření splněna podmínka dle normy, proto bylo provedeno opakované měření. V tomto případě již došlo ke splnění podmínky.

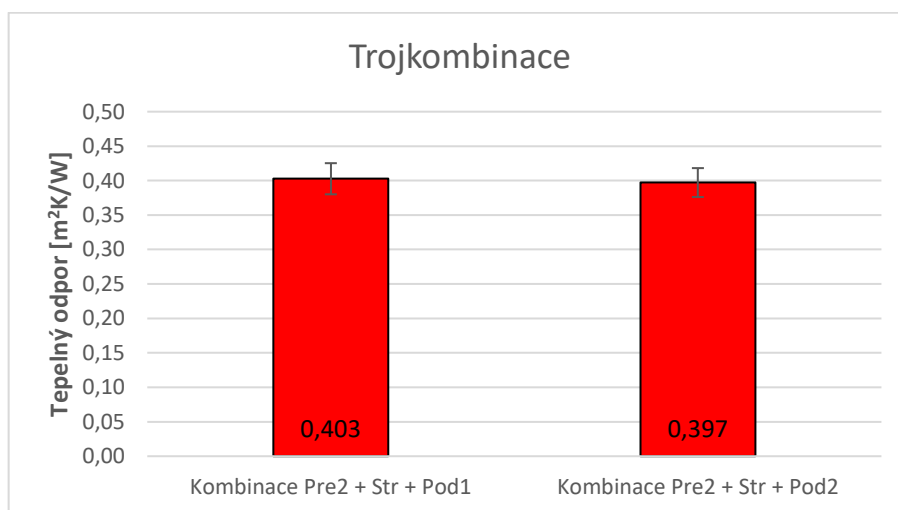
Tabulka 5.6: Srovnání tepelných odporů trojkombinací

Tepelný odpor kombinace		Naměřené hodnoty		Vypočtené hodnoty			Nejistota typu C
		levá ruka	pravá ruka	průměr	rozdíl	v procentech	
<b>Pre2 + Str + Pod1</b>	[m²K/W]	0,397	0,408	0,403	0,011	2,74 %	± 0,023
Pre2 + Str + Pod2 1. měření	[m²K/W]	0,380	0,402	0,391	0,022	5,69 %	-
Pre2 + Str + Pod2 2. měření	[m²K/W]	0,399	0,408	0,403	0,009	2,12 %	-
<b>Průměr Pre2 + Str + Pod2</b>	[m²K/W]	-	-	0,397	-	-	± 0,021



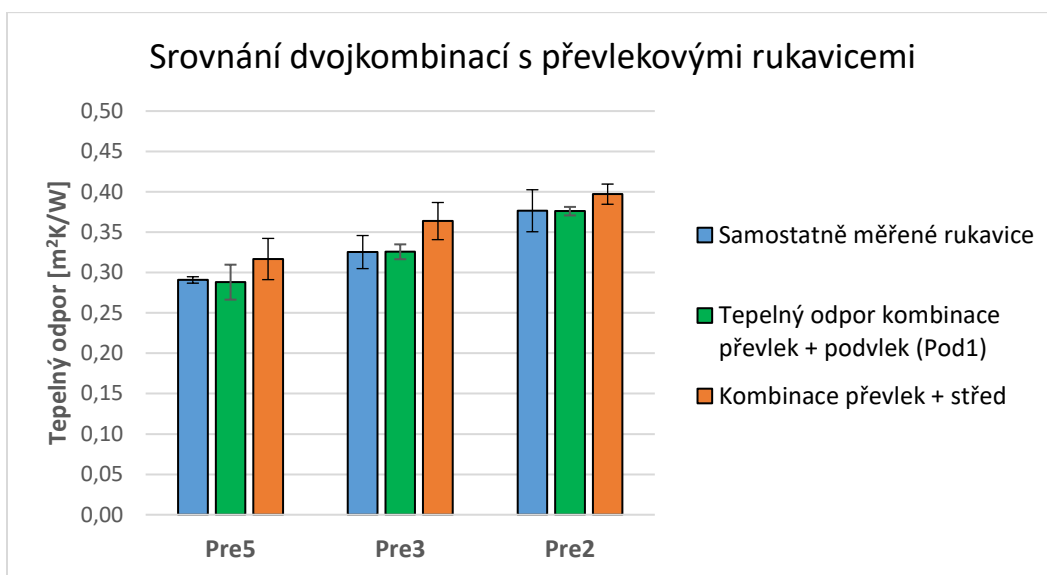


Obrázek 5.10: Srovnání tepelných odporů trojkombinací



Obrázek 5.11: Tepelné odpory včetně kombinované nejistoty

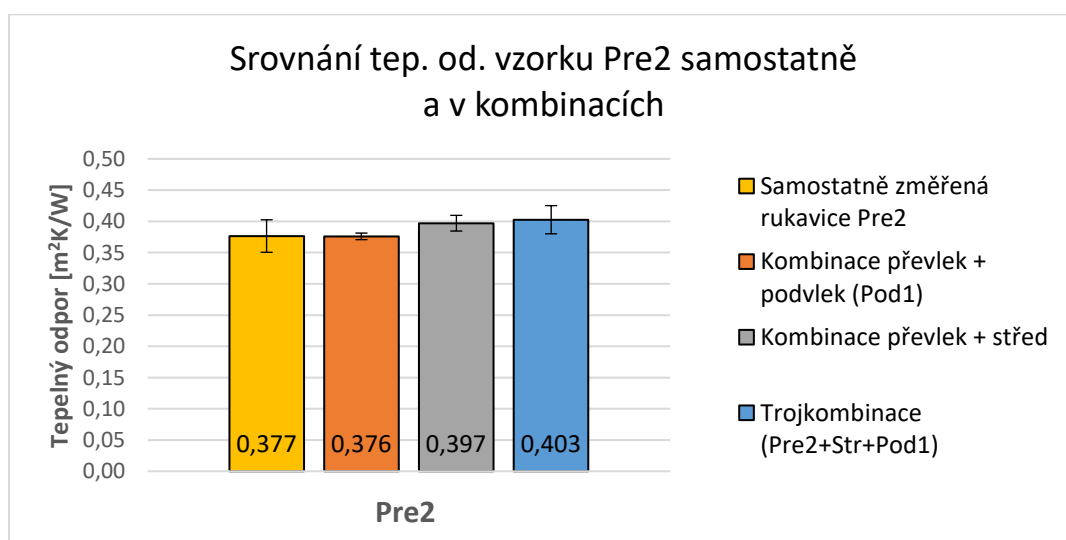
## Vyhodnocení dat



Obrázek 5.12: Srovnání dvojkombinací a samostatných převlekových ruk.

V grafu Obrázek 5.12 vidíme srovnání tepelného odporu dvojkombinací převlekové a podvlekové/středové rukavice a samostatně změřených převlekových rukavic. U dvojkombinace s podvlekovou rukavicí je změřený odpor v rámci nejistoty měření totožný a podvlekové rukavice nijak ke zvýšení tepelného odporu nepřispívají. Tento fakt je dán velice malým tepelným odporem podvlekových rukavic a mohutností převlekových rukavic s množstvím fixovaného vzduchu.

Dvojkombinace se středovou rukavicí již jisté zlepšení přináší, ale stále je zvýšení tepelného odporu kombinace pouze malou částí tepelného odporu rukavice střední. Konkrétně se jedná o zvýšení tep. odporu o 8,9 % u Pre5, 11,8 % u Pre3 a 5,4 % u Pre2.



Obrázek 5.13: Srovnání samotného vzorku Pre2 a v kombinacích

V grafu Obrázek 5.13 lze vidět hodnoty tepelného odporu převlekové rukavice změřené samostatně, ve dvojkombinaci s podvlekovou rukavicí Pod1, ve dvojkombinaci se střední rukavicí Str a ve trojkombinaci se oběma zmíněnými vzorky. Na základě těchto výsledků lze potvrdit fakt, že podvleková rukavice nezvyšuje tepelný odpor celé kombinace. V obou případech je její vliv na zanedbatelný. Střední rukavice v obou případech zvyšuje hodnotu celkového tepelného odporu, ale nijak razantně.

Výhoda modulární kombinace rukavic nespočívá ve zvýšení ochrany rukou, ale v možnosti reagovat na nastalou situaci a přizpůsobit motorické schopnosti rukou požadované činnosti.

## 6 TEORETICKÝ VÝPOČET TEPELNÉHO ODPORU RUKAVIC

V této kapitole byly výpočtově otestovány dva předpoklady, zaprvé, zda je tepelný odpor modulární kombinace rukavic možné získat pouhým sečtením jednotlivě naměřených tepelných odporů rukavic tvořící tuto kombinaci, zadruhé, zda lze stanovit tepelný odpor rukavice rozdílem mezi trojkombinací, která tuto rukavici obsahuje, a dvojkombinací.

V této kapitole jsou uvedeny tři příklady těchto výpočtů, další jsou umístěny v příloze.

### Výpočet nejistot

Kombinovaná nejistota byla vypočtena pomocí kvadratického průměru:

$$K = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \quad (6.1)$$

Příklad výpočtu pro kombinaci Pre2 + Str + Pod1:

$$\begin{aligned} K &= \sqrt{\frac{u_{C,Pre2}^2 + u_{C,Str}^2 + u_{C,Pod1}^2}{3}} \\ &= \sqrt{\frac{0,026^2 + 0,010^2 + 0,002^2}{3}} = 0,016 \end{aligned} \quad (6.2)$$

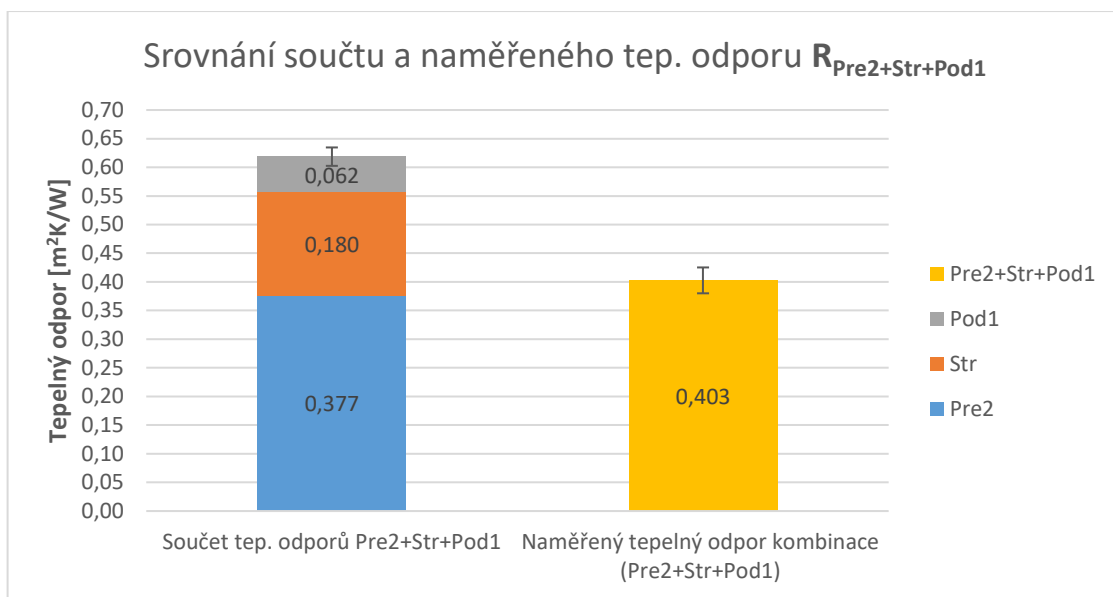
### 6.1 Součet jednotlivých tepelných odporů v porovnání s tep. odporem celé kombinace

#### Trojkombinace

Výpočtem jsme mezi sebou porovnali trojkombinace tvořené převlekovým palčákem, střední rukavicí a oběma podvlekovými rukavicemi, konkrétně se jedná kombinace Pre2 + Str + Pod1 a Pre2 + Str + Pod2.

Tabulka 6.1: Srovnání vypoč. a naměřeného tep. odporu trojkombinace s Pod1

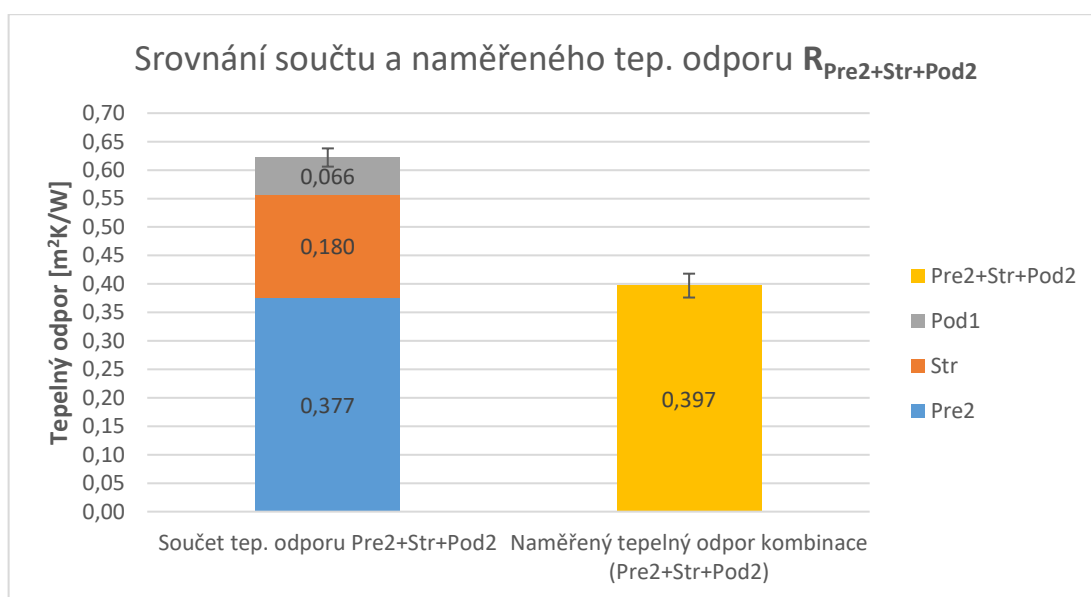
	Jednotka	Hodnota	Nejistoty typu C
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Pre2}$	[m <sup>2</sup> K/W]	0,377	± 0,026
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Str}$	[m <sup>2</sup> K/W]	0,180	± 0,010
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Pod1}$	[m <sup>2</sup> K/W]	0,062	± 0,002
Součet tep. odporů $R_{Pre2+Str+Pod1}$	[m <sup>2</sup> K/W]	0,619	± 0,016
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Pre2,Str,Pod1}$	[m <sup>2</sup> K/W]	0,403	± 0,023
Rozdíl	[m <sup>2</sup> K/W]	0,216	-
V procentech	[%]	53,636	-



Obrázek 6.1: Srovnání tep. odporů včetně kombinované nejistoty

Tabulka 6.2: Srovnání vypoč. a naměřeného tep. odporu trojkombinace s Pod2

	Jednotka	Hodnota	Nejistoty typu C
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{\text{Pre2}}$	$[\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$	0,377	$\pm 0,026$
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{\text{Str}}$	$[\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$	0,180	$\pm 0,010$
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{\text{Pod2}}$	$[\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$	0,066	$\pm 0,002$
Součet tep. odporu $R_{\text{Pre2+Str+Pod2}}$	$[\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$	0,622	$\pm 0,016$
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{\text{Pre2,Str,Pod2}}$	$[\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$	0,397	$\pm 0,021$
Rozdíl	$[\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$	0,225	-
V procentech	$[\%]$	56,658	-



Obrázek 6.2: Srovnání tep. odporů včetně kombinované nejistoty

V grafech Obrázek 6.1 a Obrázek 6.2 je porovnávána hodnota součtu jednotlivě naměřených tepelných odporů rukavic v kombinaci s naměřeným tepelným odporem celé kombinace. V obou případech je hodnota součtu o více než 50 % vyšší než změřená hodnota. Rozdíl mezi tepelnými odpory podvlekových rukavic je malý, a proto se výsledná hodnota odporu u trojkombinací příliš neliší.

Nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím výslednou hodnotu je množství vzduchu obsažené v jednotlivých vzorcích při jejich samostatném měření. Izolační vlastnosti vzduchu, zachyceného mezi povrchem manekýna, u všech vzorků rukavic zvyšují jejich tepelný odpor. Při měření v modulární kombinaci je však tento prostor vyplněn dalšími moduly rukavic, jejichž tepelný odpor má podobnou hodnotu jako samostatný vzduch.

Palčákové rukavice Pre2 mají mohutnou konstrukci, na hřbetu i na dlani je použita silná vrstva izolačního materiálu Primaloft a při měření samotných rukavic jejichž velikost je č. 11 obsahují i velké množství vzduchu mezi povrchem manekýna a rukavicí. Proto je hodnota tepelného odporu samostatně měřené rukavice Pre2 pouze o 6,9 %, respektive 5,5 % nižší než hodnota celé trojkombinace Pre2 + Str + Pod1.

### Dvojkombinace

Stejným součtovým výpočtem byla ověřena hodnota tepelných odporů u dvojkombinací převlekové a podvlekové rukavice:  $R_{Pre5+Pod1}$ ,  $R_{Pre3+Pod1}$ ,  $R_{Pre2+Pod1}$  a  $R_{Pre2+Pod2}$ . U těchto kombinací je rozdíl mezi změřenými tepelnými odpory kombinace a pouze převlekové rukavice minimální v rámci vypočtených nejistot měření. Tepelný odpor podvlekové rukavice je malý a téměř nehraje v celkovém odporu kombinace roli.

Také dvojkombinace převlekové a střední rukavice byly výpočtově ověřeny. Konkrétně se jedná o kombinace: Pre5 + Str, Pre3 + Str a Pre2 + Str. Zde jsou výsledky podobné jako trojkombinací, hodnota tepelného odporu kombinace je u Pre5 o 8,9 %, u Pre3 o 11,8 % a u Pre2 5,5 % vyšší než u samostatně měřené převlekové rukavice. Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že i u trojkombinace je hlavní příčinou zvýšení jejího tepelného odporu střední rukavice a tenké podvlekové mají minimální vliv.

Výsledky výpočtů jsou včetně grafů umístěny v příloze.

### Zhodnocení součtových výpočtů

Vypočtená hodnota tepelného odporu je ve všech případech o desítky procent vyšší než v případě měření celé sestavy a u jednotlivých kombinací se razantně mění. Na základě tohoto faktu, nelze výpočtovou metodu doporučit. V případě, že chceme získat přesně tepelný odpor celé modulární sestavy rukavic je nutné jej změřit, protože jej nelze, s dostatečnou přesností, získat součtem hodnot tepelných odporů jednotlivě měřených rukavic.

## 6.2 Výpočet tepelného odporu vzorku rozdílem dvou kombinací

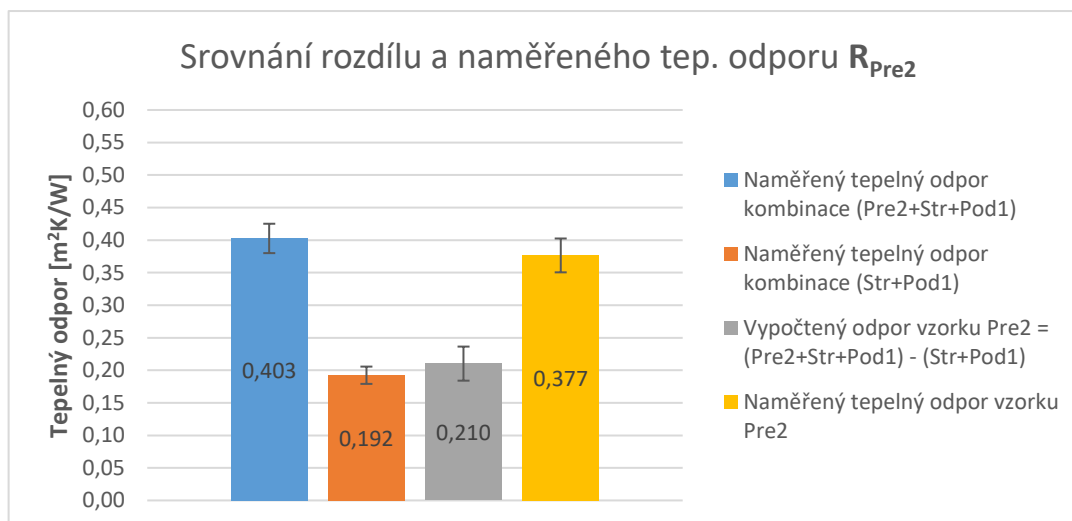
### Výpočet palčákové převlekové rukavice

V tomto případě bylo cílem výpočtu stanovit tepelný odpor vzorku Pre2. Jeho výpočet proběhl podle následující rovnice:

$$R_{Pre2} = R_{Pre2,Str,Pod1} - R_{Str,Pod1} [m^2K/W] \quad (6.3)$$

Tabulka 6.3: Srovnání vypočteného a naměřeného tep. odporu vzorku Pre2

	Jednotka	Hodnota	Nejistoty typu C
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Pre2,Str,Pod1}$	$[m^2K/W]$	0,403	$\pm 0,023$
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Str,Pod1}$	$[m^2K/W]$	0,192	$\pm 0,013$
Vypočtený odpor vzorku $R_{Pre2,vyp} = R_{Pre2,Str,Pod1} - R_{Str,Pod1}$	$[m^2K/W]$	0,210	$\pm 0,026$
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Pre2, měř}$	$[m^2K/W]$	0,377	$\pm 0,026$
Rozdíl	$[m^2K/W]$	0,166	-
V procentech	[%]	44,158	-



Obrázek 6.3: Srovnání tep. odporů včetně kombinované nejistoty

Vypočtený  $R_{Pre2,vyp}$  je o 44 % nižší než jeho naměřená hodnota. Jak již bylo popsáno v kapitole 5.2.1 tvoří část  $R_{Pre2,měř}$  vzduch obsažený v rukavici, v případě výpočtu tepelného odporu  $R_{Pre2,vyp}$  dle výše uvedené rovnice, dojde i k odečtení tepelného odporu vzduchu obsaženého ve dvojkombinaci Str+Pod1, čímž dojde k zásadnímu zkreslení. Na základě tohoto faktu nelze tento výpočet doporučit.

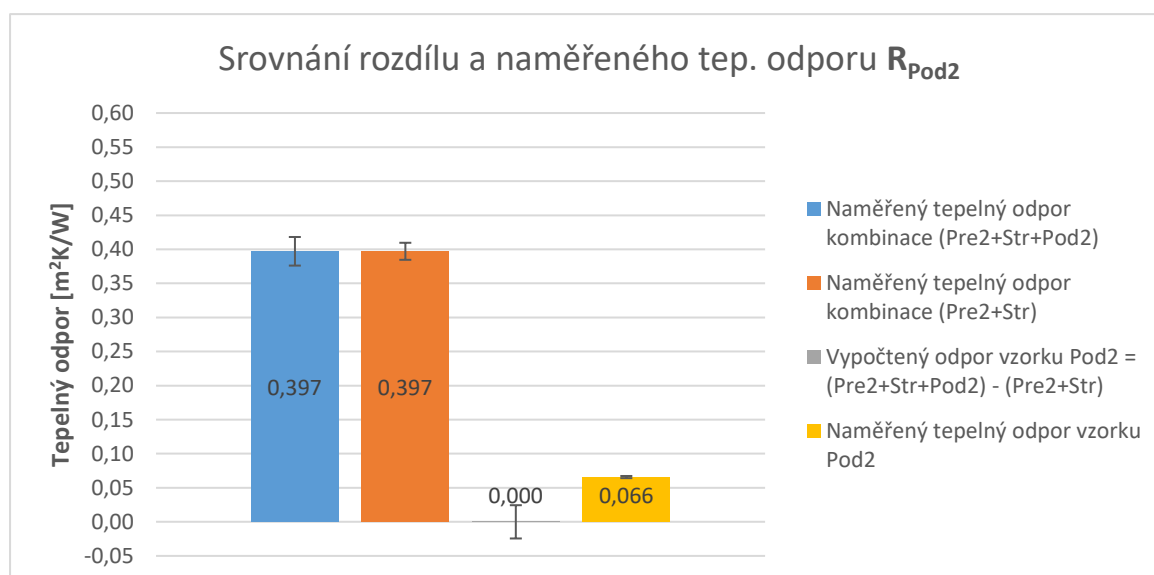
## Výpočet podvlekové rukavice Pod2

Výpočtem jsme stanovili tepelný odpor tenké podvlekové rukavice Pod2. Její výpočet proběhl podle následující rovnice:

$$R_{Pod2} = R_{Pre2,Str,Pod2} - R_{Pre2,Str} [m^2K/W] \quad (6.4)$$

Tabulka 6.4: Srovnání vypočteného a naměřeného tep. odporu vzorku Pod2

	Jednotka	Hodnota	Nejistoty typu C
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Pre2,Str,Pod2}$	$[m^2K/W]$	0,397	$\pm 0,021$
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Pre2,Str}$	$[m^2K/W]$	0,397	$\pm 0,013$
Vypočtený odpor vzorku $R_{Pod2} = R_{Pre2,Str,Pod2} - R_{Pre2,Str}$	$[m^2K/W]$	0,000	$\pm 0,024$
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Pod2}$	$[m^2K/W]$	0,066	$\pm 0,002$
Rozdíl	$[m^2K/W]$	0,066	-
V procentech	[%]	99,974	-



Obrázek 6.4: Srovnání tep. odporů včetně kombinované nejistoty

Z grafu je patrné, že tepelný odpor  $R_{Pod2}$  je v obou kombinacích prakticky zanedbatelný, protože  $R_{Pre2,Str,Pod2}$  a  $R_{Pre2,Str}$  si jsou téměř rovny a rozdíl mezi vypočtenou a naměřenou hodnotou je skoro 100 %. Tento typ výpočtu pro rukavice s nízkou tepelnou izolací je obzvláště nevhodný.

Další rozdílové výpočty jsou uvedeny včetně grafů v příloze.

## Zhodnocení rozdílových výpočtů

Vypočtená hodnota tepelného odporu je ve všech případech o desítky procent nižší než v případě měření a u jednotlivých kombinací se, jako v případě součtových rovnic, velmi mění. Proto nelze, ani v tomto případě, výpočtovou metodu doporučit pro výpočet tepelného odporu kombinace. U rukavic s nízkým tepelným odporem může dojít až k jejich kompletnímu zanedbání.



## 7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo shromáždit poznatky a podklady týkající se testování tepelně technických vlastností rukavic a jejich modulárních kombinací pomocí tepelného manekýna. V první části práce je sepsán teoretický základ popisující jednotlivé mechanismy přenosu tepla a jejich vliv na výpočet tepelného odporu rukavic. V této části jsou také popsány vybrané materiály a membrány použité v konstrukci rukavic. Dále je v práci provedena rešerše normy ČSN EN 511 [23], která popisuje metodiku testování tepelně-technických vlastností rukavic. Dle této metodiky byla posléze provedena všechna měření, jejichž výsledky jsou v této práci obsaženy.

Prvně došlo k ověření tepelného odporu vzorků rukavic, které v roce 2016 změřila Pidrová [1], dle zjednodušené metodiky založené na požadavcích normy ČSN EN 511. Z výsledků uvedených v kapitole 5.1 je patrné, že daná metodika vedla k podhodnocení tepelného odporu rukavic až o desítky procent. Čím byla testovaná rukavice tenčí, tím větší byly nepřesnosti. Dle normy je vzorek testován při proudění vzduchu o rychlosti  $4 \pm 0,5$  m/s, při které existuje na povrchu rukavice jen tenká mezní vrstva, avšak dle zjednodušené metodiky bylo měření prováděno bez proudění vzduchu a tepelný odpor mezní vrstvy byl tak podstatně vyšší. Výsledné rozdíly lze vysvětlit právě na základě faktu, že ve zjednodušené metodice byla hodnota konvektivního tepelného odporu zcela odečtena od celkového odporu rukavic, což vedlo k nepřesnosti výsledků v porovnání s postupem dle ČSN EN 511.

Dále bylo změřeno šest nových vzorků rukavic, připravených firmou Holík International s.r.o., trojího typu (dvě tenké podvlekové, jedna střední a tři převlekové rukavice). Převlekové rukavice neměly normou předepsanou velikost č. 9, ale č. 11, což vedlo k nadhodnocení jejich tepelného odporu. Tato velikost byla ovšem nezbytná, z důvodu k jejich využití jako poslední vrstvy modulárních rukavic.

Celkově bylo změřeno devět dvojkombinací a dvě trojkombinace. Výsledky těchto měření lze nalézt v kapitole 5.2, včetně výpočtu nejistot, a plyne z nich fakt, že tepelný odpor celé kombinace je značně závislý na hodnotě tepelného odporu vnější rukavice. Pokud jsou jednotlivé rukavice měřeny samostatně, jsou případné volné prostory mezi povrchem a rukavicí vyplněny vzduchem, který navyšuje její tepelný odpor, a navíc je součástí tepelného odporu každé samostatně měřené rukavice i konvektivní odpor mezní vrstvy. Naopak v případě, že jsou rukavice měřeny ve dvoj či troj modulu, je tento vzduch vytlačen pryč a vrstvy vzduchu jsou nahrazeny materiálem rukavic, ve kterém je vzduch zachycen v izolačním materiálu. V místě dotyku vrstev dochází k přestupu tepla vedením a výsledný tepelný odpor je tak podobný jako odpor samotného vzduchu. U vložených rukavic dochází dále k jejich stlačení a tím snížení objemu vzduchu oproti stavu při měření samostatných rukavic. Také tímto faktem lze vysvětlit malý vliv druhé či třetí vrstvy modulární kombinace na její celkový tepelný odpor.

V šesté kapitole byla výpočtovými vztahy ověřena hypotéza, zda lze celkový tepelný odpor modulární kombinace získat součtem odporů jednotlivých vzorků. Vyhodnocením výsledků získaných tímto postupem ukázalo, že odpor modulární kombinace nelze dostatečně přesně určit výpočtem z hodnot získaných při měření jednotlivých rukavic, ale pro získání přesné hodnoty je nutné experimentálně změřit celou modulární kombinaci.

Tématika experimentálního testování rukavic nabízí mnohé další možnosti zkoumání. Jednou z možností je porovnat vliv vlhkosti vzorku na jeho tepelný odpor či testování prodyšnosti rukavic za pomoci manekýna se zabudovaným pocením. Dalším krokem je možnost otestovat změřené vzorky v reálném prostředí za pomoci dobrovolníků.

## CITOVANÁ LITERATURA

- [1] PIDROVÁ, Kateřina. *Testování tepelných vlastností rukavic pomocí tepelného manekýna*. Brno, 2016. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.
- [2] CHEUNG, Stephen. Responses of the hands and feet to cold exposure. *Temperature* [online]. 2015, **2**(1), 105-120 [cit. 2017-05-09]. DOI: 10.1080/23328940.2015.1008890. ISSN 2332-8940. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23328940.2015.1008890>
- [3] The History of Gloves. In: *Go Planet Gloves* [online]. Windlesham, United Kingdom, 2011 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.goleathergloves.com/history-of-gloves.htm>
- [4] STANKOVSKI, Kristina. Gloves. In: *Love to know* [online]. Burlingame, CA, USA: LoveToKnow Corp., 2016 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://fashion-history.lovetoknow.com/clothing-types-styles/gloves>
- [5] JANOTKOVÁ, Eva. *Technika prostředí*. Brno, 2010. Dostupné také z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/vyuka/technikaprostredi/SylabyTP6.pdf>. Skripta.
- [6] Human Thermal Module: Our products. *ThermoAnalytics: Total thermal solutions* [online]. 2017 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.thermoanalytics.com/products/human-thermal>
- [7] PAVELEK, Milan a Josef ŠTĚTINA. Přenos tepla. *Termomechanika* [online]. Brno, b.r. [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/termomechanika/teorie/T10-01.htm>
- [8] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2029-4.
- [9] CLARK, R. a O. EDHOLM. *Man and his thermal environment* [online]. 1985. London: E. Arnold, 1985 [cit. 2017-05-08]. ISBN 978-071-3144-451. Dostupné z: [http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/royinterface/6/Suppl\\_6/S767/F3.large.jpg](http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/royinterface/6/Suppl_6/S767/F3.large.jpg)
- [10] Termoregulace. *WikiSkripta: projekt sítě lékařských fakult MEFANET* [online]. 2016 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Termoregulace>
- [11] Termoregulace. FONTANA, Josef. *Funkce buněk a lidského těla: Multimediální skripta* [online]. 2015 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z:

<http://fbilt.cz/skripta/xi-regulacni-mechanismy-1-endokrinni-regulace/11-termoregulace/>

- [12] The Layering System. *Mountain warehouse* [online]. 2015 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://www.mountainwarehouse.com/expert-advice/the-layering-system>
- [13] Rainwear: How It Works. *REI.com* [online]. 2016 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://www.rei.com/learn/expert-advice/rainwear-how-it-works.html>
- [14] CLOUGH, Norman. Innovations in ePTFE fiber technology: New capabilities, new applications, new opportunities. *Techtextil North America Symp. 2009* [online]. b.r., s. 1-4 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: [https://www.gore.com/sites/g/files/ypype116/files/2016-04/ePTFE\\_INNOVATIONS\\_WHITE\\_PAPER.pdf](https://www.gore.com/sites/g/files/ypype116/files/2016-04/ePTFE_INNOVATIONS_WHITE_PAPER.pdf)
- [15] Gore-Tex Fabric - schéma. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Gore-Tex#/media/File:Goretex\\_schema-en.png](https://cs.wikipedia.org/wiki/Gore-Tex#/media/File:Goretex_schema-en.png)
- [16] How to Re-Treat Garments. *Sano-Tred* [online]. 2015 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://sanitred.com/how-to-re-treat-garments/>
- [17] Stroj na testování membrán. In: *Holík International s.r.o.* [online]. Holík International s.r.o., 2013 [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: <http://www.holik-international.cz/technologie>
- [18] Nomex®. *Explain that stuff!* [online]. Chris Woodford, 2016 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <http://www.explainthatstuff.com/nomex.html>
- [19] Specifikace materiálu: Nomex. *Odetka a.s.* [online]. 2016 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: [http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat\\_nomex.aspx](http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_nomex.aspx)
- [20] SONG, Guowen, Sumit MANDAL a René ROSSI. *Thermal protective clothing for firefighters*. 1st edition. Duxford, United Kingdom: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-08-101285-7. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780081012857>
- [21] PrimaLoft. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/PrimaLoft>
- [22] Structure of Cordura. In: *Carryology* [online]. 2016 [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <http://www.carryology.com/interviews-regular/cordura-business-fabrics/>

- [23] ČSN EN 511 - *Ochranné rukavice proti chladu*. 1. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2006, 20 s.
- [24] ČSN EN ISO 15831 - *Měření tepelné izolace pomocí tepelné figuríny*. 1. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2004, 16 s.
- [25] *Newton Thermal Manikin Operators Manual*. Measurement Technology Northwest. Seattle, USA, 2010.
- [26] FIŠER, Jan. Tepelný manekýn Newton. In: *Energetické fórum* [online]. b.r. [cit. 2017-03-27]. Dostupné z: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/pristrojove-vybaveni/tepelný-mankyn-newton>
- [27] ŠTĚTINA, Josef. Klimatická komora. *Energetické fórum* [online]. Brno, b.r. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/laboratore/klimaticka-komora>
- [28] Testo 435-2: multifunkční měřicí přístroj. *Testo* [online]. 2017 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <https://www.testo.com/cz-CZ/testo-435-2/p/0563-4352>
- [29] Termická sonda proudění s integrovaným měřením teploty a vlhkosti. *Testo* [online]. 2017 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <https://www.testo.com/cz-CZ/termicka-sonda-proudeni-s-integrovanym-merenim-teploty-a-vlhkosti/p/0635-1535>
- [30] HOLÍK INTERNATIONAL S.R.O., . *Modely rukavic pro modulární měření v klimatické komoře*. Zlín, 2016.
- [31] URBÁNEK, Zdeněk. *Přesnost nepřímých měření*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. František Vdoleček, CSc.
- [32] ADAMEC, Martin. *Stanovení nejistoty měření*. Brno, 2011. Dostupné také z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=41147](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41147). Diplomová práce.
- [33] FOJTLÍN, Miloš, Jan FIŠER a Miroslav JÍCHA. Determination of convective and radiative heat transfer coefficients using 34-zones thermal manikin: Uncertainty and reproducibility evaluation. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2016, **77**, 257-264 [cit. 2017-05-13]. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2016.04.015. ISSN 08941777. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177716300917>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

### Římské symboly

$k_{UA}$	bezpečností faktor	$[-]$
$R_C$	celkový tepelný odpor rukavic	$[m^2K/W]$
$\dot{q}_o$	celkový tepelný tok	$[W \cdot m^{-2}]$
$\frac{dT}{dx}$	derivace teploty funkcí délky	$[K \cdot m^{-1}]$
$f$	frekvence	$[Hz]$
grad T	gradient teploty na jednotku délky	$[K \cdot m^{-1}]$
$\vec{q}$	hustota tepelného toku	$[W \cdot m^{-2}]$
$E_0$	intenzita vyzařování černého tělesa	$[W \cdot m^{-2}]$
$E$	intenzita vyzařování šedého tělesa	$[W \cdot m^{-2}]$
$x_i$	jednotlivá naměřená veličina	$[-]$
$K$	kombinovaná nejistota	$[-]$
$\dot{q}_n$	konvektivní tepelný tok mezní vrstvou	$[W \cdot m^{-2}]$
$Q_{HAND}$	množství energie dodané do měřené oblasti ruky během ustáleného stavu	$[W/m^2]$
$I_{TR}$	odolnost proti suché tep. ztrátě ruky	$[m^2K/W]$
$n$	počet měření	$[-]$
$U$	rozšířená nejistota typu C	$[-]$
$s$	směrodatná odchylka	$[-]$
$T_{HAND}$	stř. teplota povrchu měř. oblasti ruky	$[^\circ C]$
$T_A$	stř. teplota vzduchu v klim. komoře	$[^\circ C]$
$\bar{x}$	střední hodnota naměřených hodnot	$[-]$
R"označení vzorku"	tepelný odpor daného vzorku	$[m^2K/W]$
$R_\lambda$	tepelný odpor při kondukcii	$[m^2K/W]$
$R_\alpha$	tepelný odpor při konvekci	$[m^2K/W]$
$R_R$	tepelný odpor rukavice	$[m^2K/W]$
$R_v$	tepelný odpor vrstvy vzduchu	$[m^2K/W]$
$\dot{Q}$	tepelný tok	$[W]$
$S$	teplosměnná plocha	$[m^2]$
$T_{n\infty}$	teplota okol. vzduchu při měř. neobleč. ruky	$[^\circ C]$

$T_{o\infty}$	teplota okol. vzduchu při měř. s rukavicí	$[^{\circ}C]$
$t_k$	teplota pokožky člověka	$[^{\circ}C]$
$T_{np}$	teplota povrchu neoblečené ruky	$[^{\circ}C]$
$T_{op}$	teplota povrchu ruky v rukavici	$[^{\circ}C]$
$t_t$	teplota tekutiny	$[^{\circ}C]$
$t_{st}, t_{st1}, t_{st2}$	teploty povrchu stěny	$[^{\circ}C]$
$T$	termodynamická teplota	$[^{\circ}C]$

### Řecké symboly

$\varepsilon$	emisivita	$[-]$
$\mu_{x_i}$	nejistoty jednotlivých měřených veličin	$[-]$
$\mu_{\dot{q}}$	nejistota měření tepelného toku	$[-]$
$\mu_{t_k}, \mu_{t_t}$	nejistota měření teploty	$[-]$
$\mu_A$	nejistota typu A	$[-]$
$\mu_B$	nejistota typu B	$[-]$
$\mu_C$	nejistota typu C	$[-]$
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	$[W.m^{-2}.K^{-1}]$
$\sigma$	Stefan-Boltzmanova konstanta	$[W.m^{-2}.K^{-4}]$
$\delta$	tloušťka stěny	$[m]$

### Zkratky

ePTFE	expandovaný polytetrafluoretylen
FSI	Fakulta strojního inženýrství
PES	polyester
PTFE	polytetrafluoretylen
PU	polyuretan
RH	relative humidity – relativní vlhkost



## PŘÍLOHY

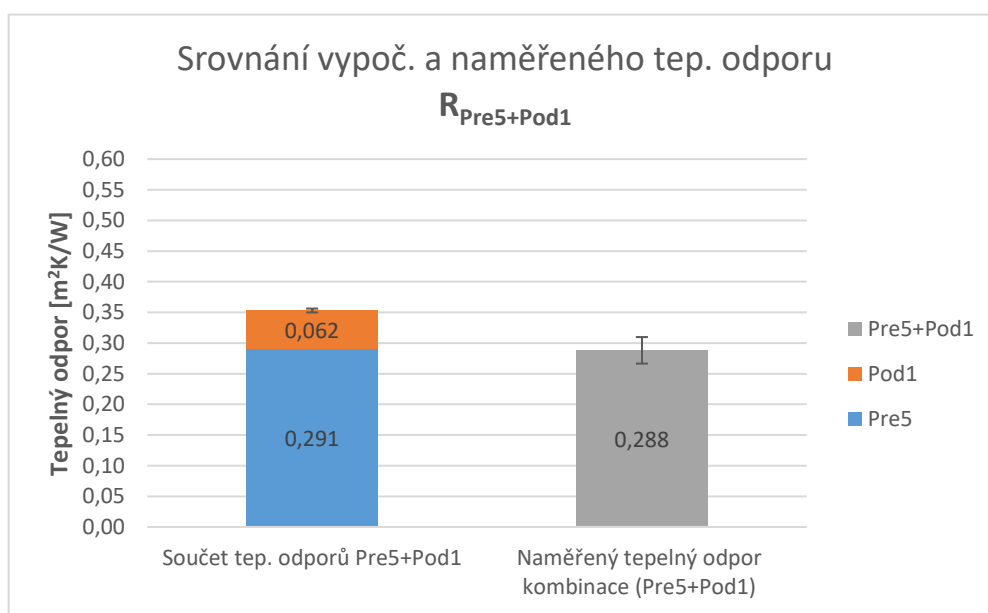
### Výpočet tepelných odporů kombinace v porovnání s jejím změřeným tep. odporem

Tepelný odpor kombinace  $R_{Pre5,Pod1}$

$$R_{Pre5,Pod1} = R_{Pre5} + R_{Pod1} [m^2K/W] \quad (0.1)$$

Tabulka 0.1: Srovnání vyp. a naměřeného tep. odporu kombinace Pre5+Pod1

	Jednotka	Hodnota	Nejistoty typu C
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Pre5}$	$[m^2K/W]$	0,291	$\pm 0,004$
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Pod1}$	$[m^2K/W]$	0,062	$\pm 0,002$
Součet tep. odporů $R_{Pre5+Pod1}$	$[m^2K/W]$	0,353	$\pm 0,003$
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Pre5,Pod1}$	$[m^2K/W]$	0,288	$\pm 0,022$
Rozdíl	$[m^2K/W]$	0,065	-
V procentech	$[\%]$	22,544	-



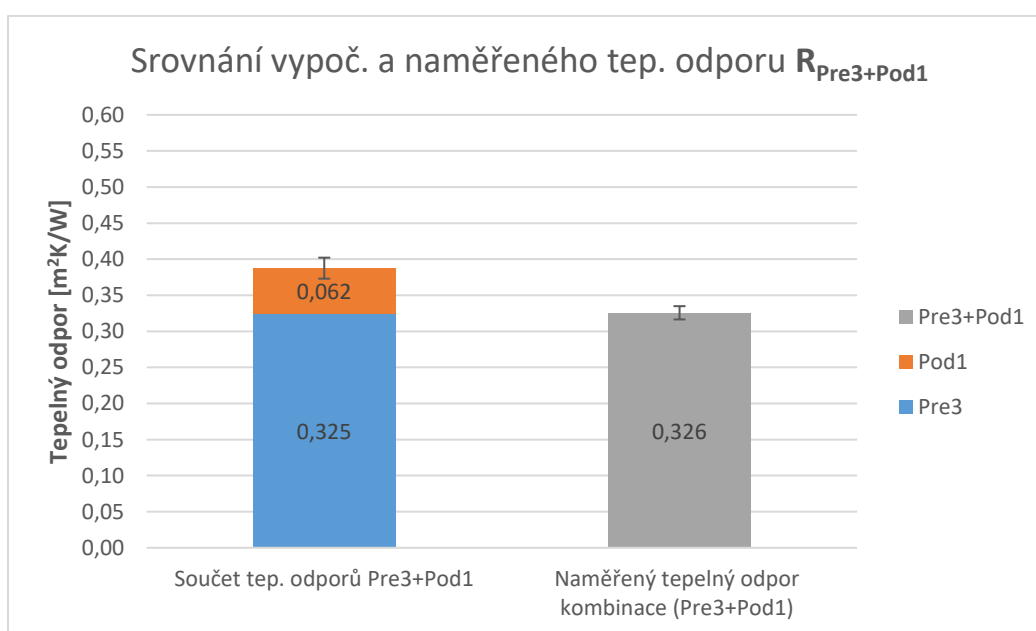
Obrázek 0.1: Srovnání tep. odporů včetně kombinované nejistoty

### Tepelný odpor kombinace $R_{Pre3,Pod1}$

$$R_{Pre3,Pod1} = R_{Pre3} + R_{Pod1} [m^2K/W] \quad (0.2)$$

Tabulka 0.2: Srovnání vyp. a naměřeného tep. odporu kombinace Pre3+Pod1

	Jednotka	Hodnota	Nejistoty typu C
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Pre3}$	$[m^2K/W]$	0,325	$\pm 0,020$
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Pod1}$	$[m^2K/W]$	0,062	$\pm 0,002$
Součet tep. odporů $R_{Pre3+Pod1}$	$[m^2K/W]$	0,388	$\pm 0,015$
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Pre3,Pod1}$	$[m^2K/W]$	0,326	$\pm 0,009$
Rozdíl	$[m^2K/W]$	0,062	-
V procentech	$[%]$	18,996	-



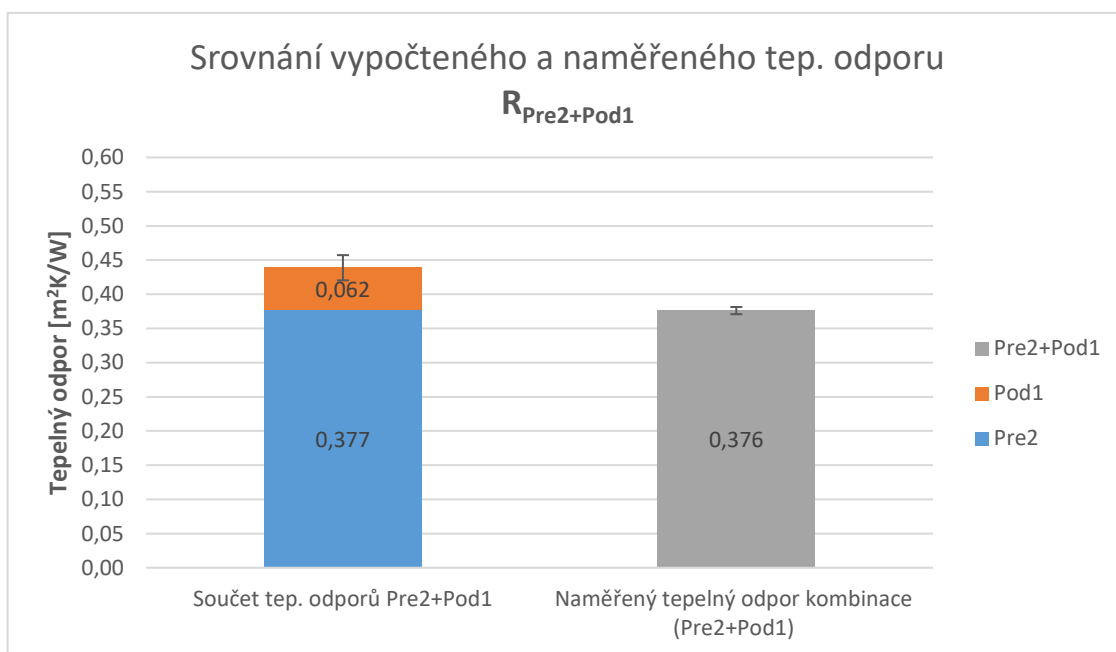
Obrázek 0.2: Srovnání tep. odporů včetně kombinované nejistoty

### Tepelný odpor kombinace $R_{Pre2,Pod1}$

$$R_{Pre2,Pod1} = R_{Pre2} + R_{Pod1} [m^2K/W] \quad (0.3)$$

Tabulka 0.3: Srovnání vyp. a naměřeného tep. odporu kombinace Pre2+Pod1

	Jednotka	Hodnota	Nejistoty typu C
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Pre2}$	$[m^2K/W]$	0,377	$\pm 0,026$
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Pod1}$	$[m^2K/W]$	0,062	$\pm 0,002$
Součet tep. odporů $R_{Pre2+Pod1}$	$[m^2K/W]$	0,439	$\pm 0,018$
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Pre2,Pod1}$	$[m^2K/W]$	0,376	$\pm 0,005$
Rozdíl	$[m^2K/W]$	0,063	-
V procentech	$[%]$	16,673	-



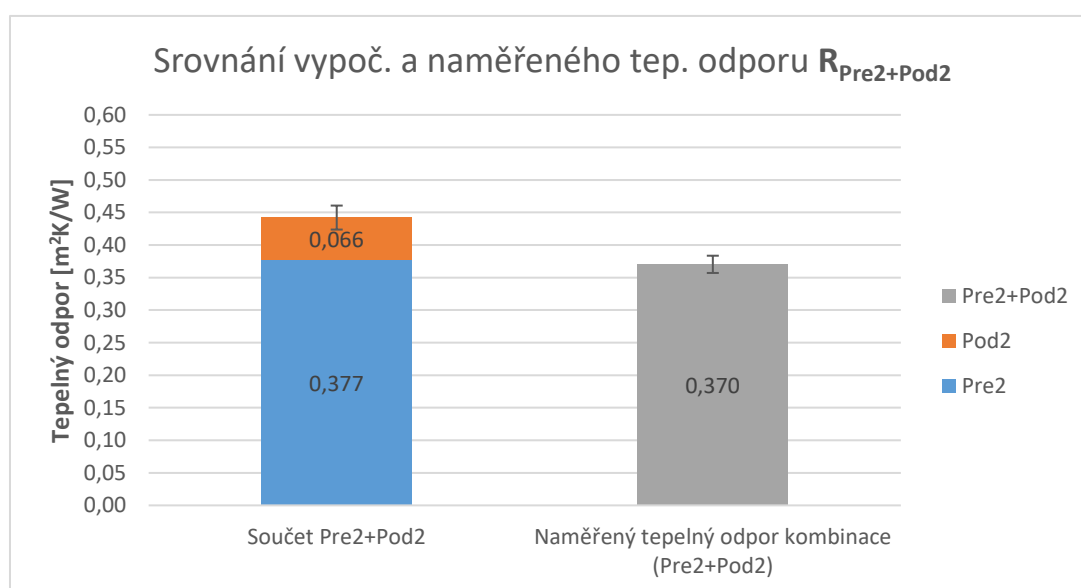
Obrázek 0.3: Srovnání tep. odporů včetně kombinované nejistoty

### Tepelný odpor kombinace $R_{Pre2,Pod2}$

$$R_{Pre2,Pod2} = R_{Pre2} + R_{Pod2} [m^2K/W] \quad (0.4)$$

Tabulka 0.4: Srovnání vyp. a naměřeného tep. odporu kombinace Pre2+Pod2

	Jednotka	Hodnota	Nejistoty typu C
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Pre2}$	$[m^2K/W]$	0,377	$\pm 0,026$
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Pod2}$	$[m^2K/W]$	0,066	$\pm 0,002$
Součet tep. odporů $R_{Pre2+Pod2}$	$[m^2K/W]$	0,442	$\pm 0,018$
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Pre2,Pod2}$	$[m^2K/W]$	0,370	$\pm 0,013$
Rozdíl	$[m^2K/W]$	0,072	-
V procentech	$[%]$	19,399	-



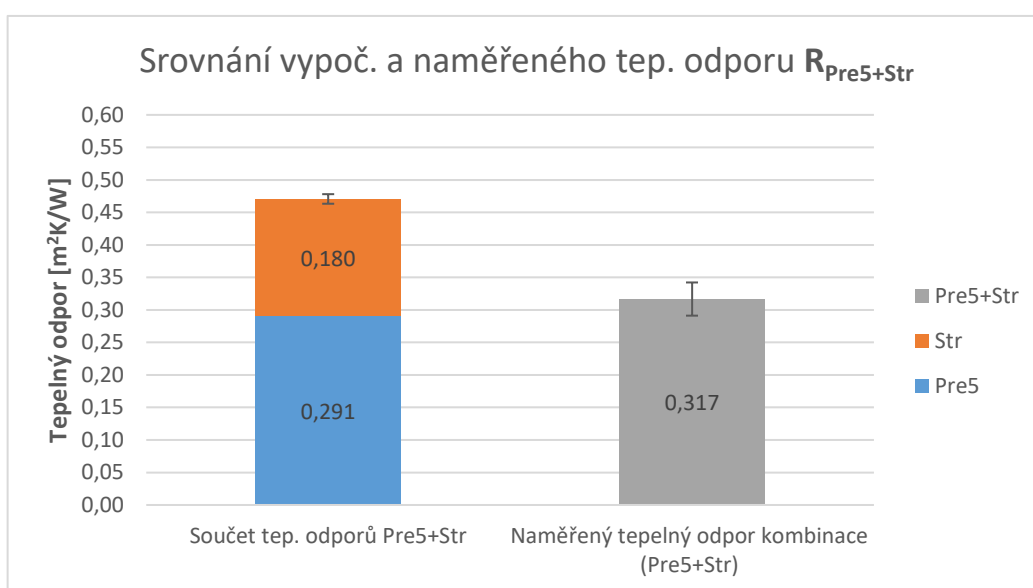
Obrázek 0.4: Srovnání tep. odporů včetně kombinované nejistoty

### Tepelný odpor kombinace $R_{Pre5,Str}$

$$R_{Pre5,Str} = R_{Pre5} + R_{Str} [m^2K/W] \quad (0.5)$$

Tabulka 0.5: Srovnání vypoč. a naměřeného tep. odporu kombinace Pre5+Str

	Jednotka	Hodnota	Nejistoty typu C
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Pre5}$	$[m^2K/W]$	0,291	$\pm 0,004$
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Str}$	$[m^2K/W]$	0,180	$\pm 0,010$
Součet tep. odporů $R_{Pre5+Str}$	$[m^2K/W]$	0,471	$\pm 0,007$
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Pre5,Str}$	$[m^2K/W]$	0,317	$\pm 0,026$
Rozdíl	$[m^2K/W]$	0,154	-
V procentech	$[%]$	48,608	-



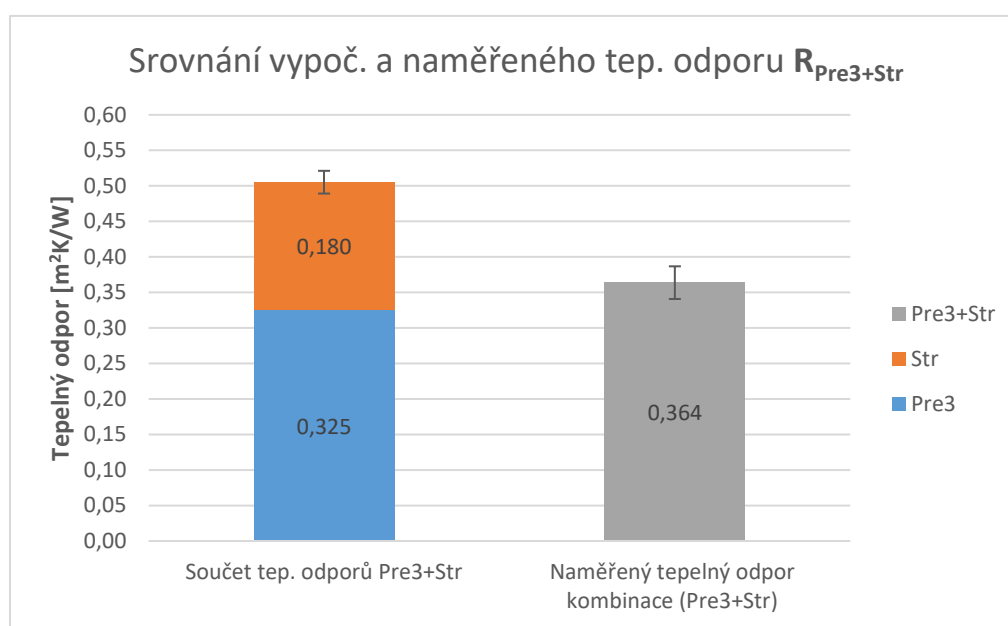
Obrázek 0.5: Srovnání tep. odporů včetně kombinované nejistoty

### Tepelný odpor kombinace $R_{Pre3,Str}$

$$R_{Pre3,Str} = R_{Pre3} + R_{Str} [m^2K/W] \quad (0.6)$$

Tabulka 0.6: Srovnání vypoč. a naměřeného tep. odporu kombinace Pre3+Str

	Jednotka	Hodnota	Nejistoty typu C
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Pre3}$	$[m^2K/W]$	0,325	$\pm 0,020$
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Str}$	$[m^2K/W]$	0,180	$\pm 0,010$
Součet tep. odporů $R_{Pre3+Str}$	$[m^2K/W]$	0,505	$\pm 0,016$
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Pre3,Str}$	$[m^2K/W]$	0,364	$\pm 0,023$
Rozdíl	$[m^2K/W]$	0,141	-
V procentech	$[%]$	38,891	-



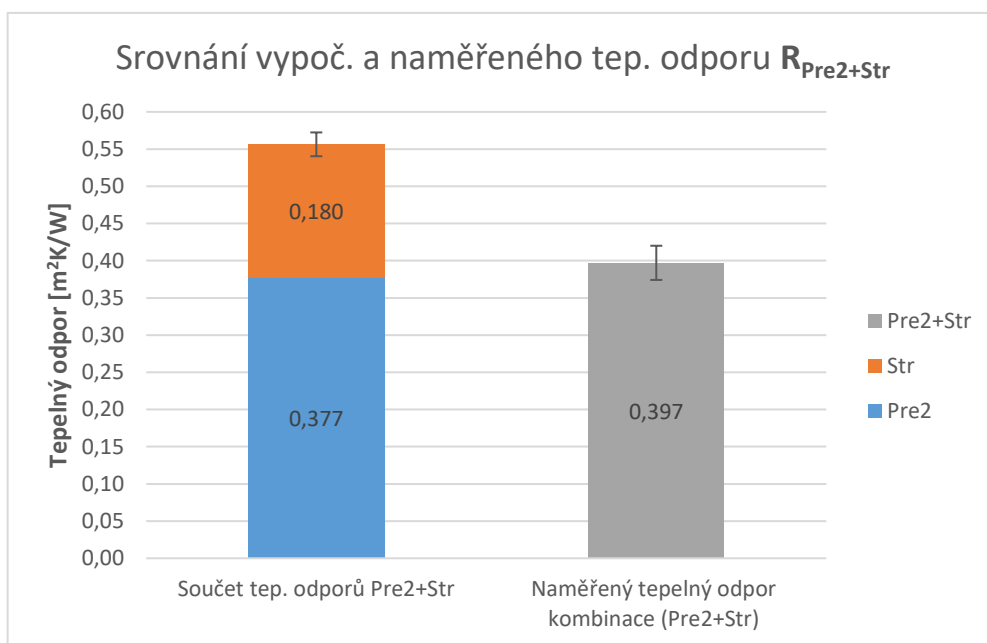
Obrázek 0.6: Srovnání tep. odporů včetně kombinované nejistoty

### Tepelný odpor kombinace $R_{Pre2,Str}$

$$R_{Pre2,Str} = R_{Pre2} + R_{Str} [m^2K/W] \quad (0.7)$$

Tabulka 0.7: Srovnání vypoč. a naměřeného tep. odporu kombinace Pre2+Str

	Jednotka	Hodnota	Nejistoty typu C
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Pre2}$	$[m^2K/W]$	0,377	$\pm 0,026$
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Str}$	$[m^2K/W]$	0,180	$\pm 0,010$
Součet tep. odporů $R_{Pre2+Str}$	$[m^2K/W]$	0,556	$\pm 0,020$
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Pre2,Str}$	$[m^2K/W]$	0,397	$\pm 0,013$
Rozdíl	$[m^2K/W]$	0,159	-
V procentech	$[%]$	40,116	-



Obrázek 0.7: Srovnání tep. odporů včetně kombinované nejistoty

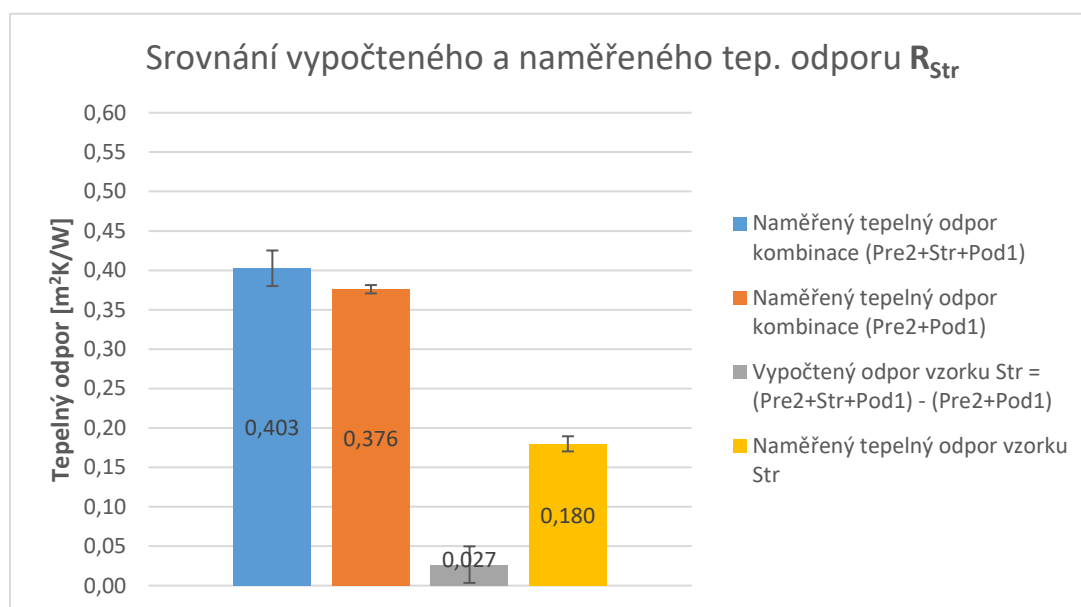
## Výpočet tepelného odporu vzorků rozdílem dvou kombinací

Tepelný odpor  $R_{Str}$

$$R_{Str} = R_{Pre2,Str,Pod1} - R_{Pre2,Pod1} [m^2K/W] \quad (0.8)$$

Tabulka 0.8: Srovnání vypočteného a naměřeného tep. odporu vzorku Str

	Jednotka	Hodnota	Nejistoty typu C
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Pre2,Str,Pod1}$	$[m^2K/W]$	0,403	$\pm 0,023$
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Pre2,Pod1}$	$[m^2K/W]$	0,376	$\pm 0,005$
Vypočtený odpor vzorku $R_{Str} = R_{Pre2,Str,Pod1} - R_{Pre2,Pod1}$	$[m^2K/W]$	0,027	$\pm 0,023$
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Str}$	$[m^2K/W]$	0,180	$\pm 0,010$
Rozdíl	$[m^2K/W]$	0,153	-
V procentech	$[%]$	85,207	-



Obrázek 0.8: Srovnání tep. odporů včetně kombinované nejistoty

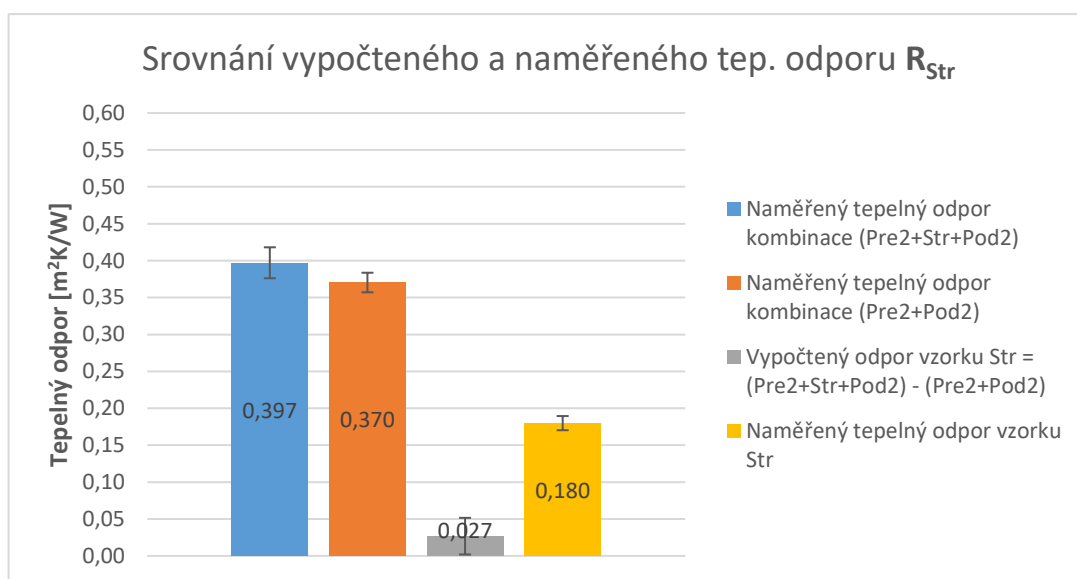


### Tepelný odpor $R_{Str}$

$$R_{Str} = R_{Pre2,Str,Pod2} - R_{Pre2,Pod2} [m^2K/W] \quad (0.9)$$

Tabulka 0.9: Srovnání vypočteného a naměřeného tep. odporu vzorku Str

	Jednotka	Hodnota	Nejistoty typu C
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Pre2,Str,Pod2}$	$[m^2K/W]$	0,397	$\pm 0,021$
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Pre2,Pod2}$	$[m^2K/W]$	0,370	$\pm 0,013$
Vypočtený odpor vzorku $R_{Str} = R_{Pre2,Str,Pod2} - R_{Pre2,Pod2}$	$[m^2K/W]$	0,027	$\pm 0,025$
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Str}$	$[m^2K/W]$	0,180	$\pm 0,010$
Rozdíl	$[m^2K/W]$	0,153	-
V procentech	$[\%]$	85,139	-



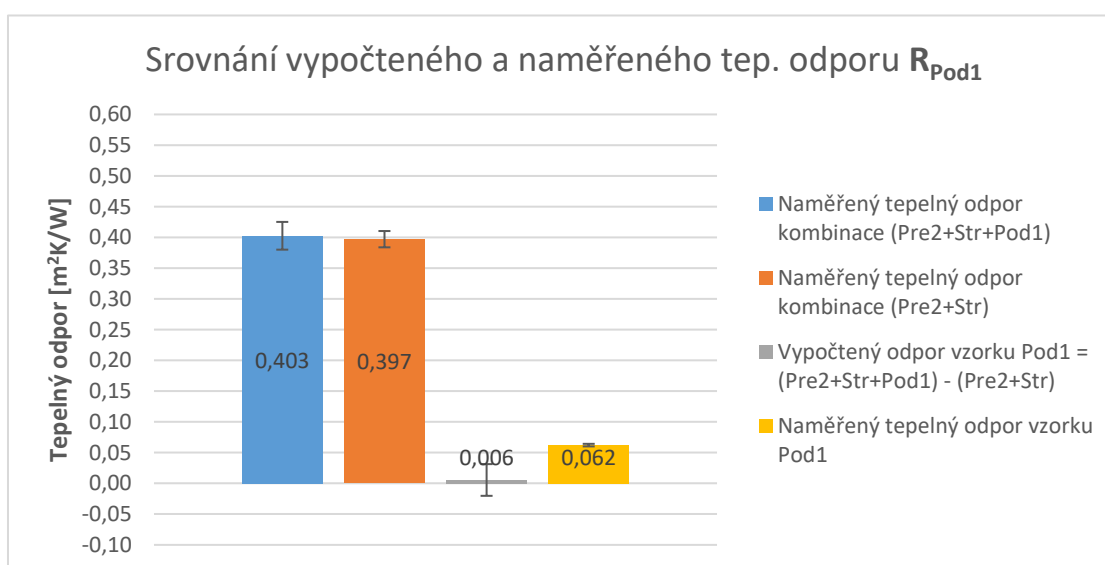
Obrázek 0.9: Srovnání tep. odporů včetně kombinované nejistoty

### Tepelný odpor $R_{Pod1}$

$$R_{Pod1} = R_{Pre2,Str,Pod1} - R_{Pre2,Str} [m^2K/W] \quad (0.10)$$

Tabulka 0.10: Srovnání vypočteného a naměřeného tep. odporu vzorku Pod1

	Jednotka	Hodnota	Nejistoty typu C
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Pre2,Str,Pod1}$	$[m^2K/W]$	0,403	$\pm 0,016$
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Pre2,Str}$	$[m^2K/W]$	0,397	$\pm 0,013$
Vypočtený odpor vzorku $R_{Pod1} = R_{Pre2,Str,Pod1} - R_{Pre2,Str}$	$[m^2K/W]$	0,006	$\pm 0,026$
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Pod1}$	$[m^2K/W]$	0,062	$\pm 0,002$
Rozdíl	$[m^2K/W]$	0,057	-
V procentech	$[%]$	91,082	-



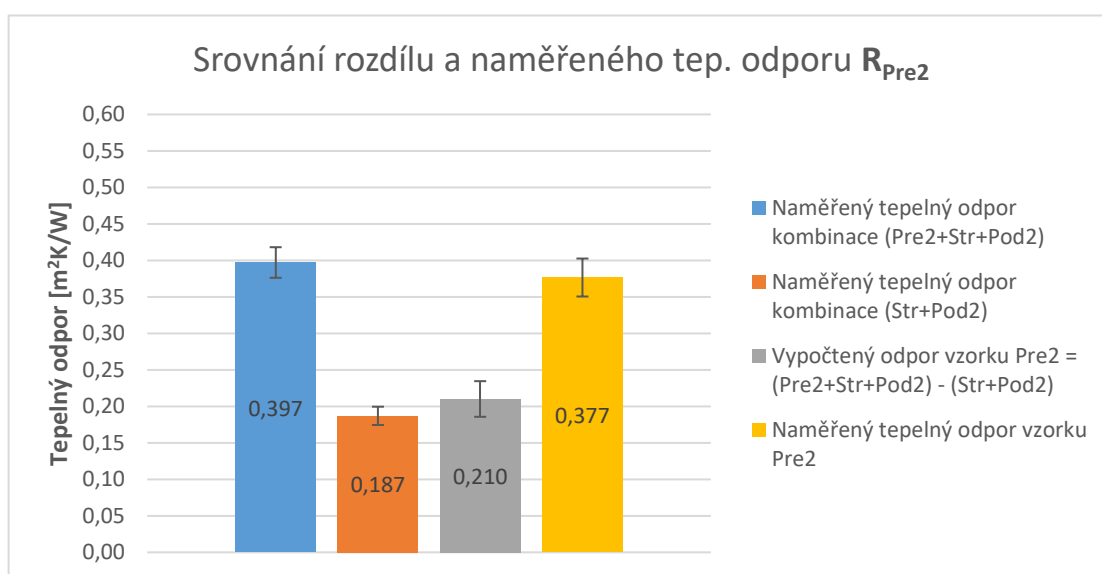
Obrázek 0.10: Srovnání tep. odporů včetně kombinované nejistoty

### Tepelný odpor $R_{Pre2}$

$$R_{Pre2} = R_{Pre2,Str,Pod2} - R_{Str,Pod2} [m^2K/W] \quad (0.11)$$

Tabulka 0.11: Srovnání vypočteného a naměřeného tep. odporu vzorku Pod1

	Jednotka	Hodnota	Nejistoty typu C
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Pre2,Str,Pod2}$	$[m^2K/W]$	0,397	$\pm 0,021$
Naměřený tepelný odpor kombinace $R_{Str,Pod2}$	$[m^2K/W]$	0,187	$\pm 0,013$
Vypočtený odpor vzorku $R_{Pre2} = R_{Pre2,Str,Pod2} - R_{Str,Pod2}$	$[m^2K/W]$	0,210	$\pm 0,024$
Naměřený tepelný odpor vzorku $R_{Pre2}$	$[m^2K/W]$	0,377	$\pm 0,026$
Rozdíl	$[m^2K/W]$	0,166	-
V procentech	[%]	44,202	-



Obrázek 0.11: Srovnání tep. odporů včetně kombinované nejistoty